

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**2010**

**Petr Kramář**

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroniky**

**Dynamometr pro malé výkony**  
**Low Power Dynamometer**

**2010**

**Petr Kramář**

## Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Petr Kramář**

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2612T015 Elektronika

Téma:

Dynamometr pro malé výkony  
Low Power Dynamometer

Zásady pro vypracování:

1. Provedte rozbor možností řešení dynamometrů pro malé výkony s ohledem na použitý pohon a jeho řízení.
2. Navrhněte a realizujte dynamometr malého výkonu se stejnosměrným motorem s permanentními magnety za použití mikropočítačového řídicího systému.
3. Na realizovaném dynamometru proveďte zkoušky a měření dle pokynů vedoucího DP a vyhodnoťte možnosti použití.

Seznam doporučené odborné literatury:

Podle pokynů vedoucího diplomové práce

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2008

Datum odevzdání: 07.05.2009



prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.  
vedoucí katedry

prof. Ing. Ivo Vondrák, CSc.  
děkan fakulty

*Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně.*

*Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.*

V Ostravě 7.5.2010

podpis: \_\_\_\_\_

Chtěl bych vyjádřit poděkování vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Petru Palackému, Ph.D. za odborné rady a připomínky v průběhu řešení této diplomové práce

## **Abstrakt:**

Obsahem této diplomové práce je stručný teoretický rozbor, návrh a praktická realizace dynamometru pro malé výkony, který je určen k použití při výuce odborných předmětů, vyučovaných katedrou elektroniky VŠB - TU Ostrava. Nejdříve je proveden teoretický rozbor možných řešení napájecích měničů s přihlédnutím k použitému pohonu a jeho řízení. Následuje návrh a praktická realizace mechanické a elektronické části dynamometru pro malé výkony se stejnosměrným motorem s permanentními magnety, za použití mikropočítačového řídicího systému se signálovým mikrokontrolérem MC56F8023. Jeho programové vybavení zajišťuje regulaci rychlosti s podřazenou smyčkou proudu pro motor dynamometru, ovládání a komunikaci s obsluhou prostřednictvím terminálového programu běžícího na PC a pomocí externího D/A převodníku poskytuje průběhy proudů a otáček motoru dynamometru. Poslední část práce obsahuje naměřené výsledky s vyhodnocením možností použití.

## **Klíčová slova:**

stejnosměrný pulzní měnič, stejnosměrný motor, bipolární řízení, unipolární řízení, pulzně šířková modulace, mikropočítačový řídicí systém, signálový mikrokontrolér MC56F8023

## **Abstract:**

The content of this thesis is a brief theoretical analysis, design and practical realization of the low power dynamometer, which is designed for use in teaching vocational subjects taught, Department of Electronics VSB - TU Ostrava. Theoretical analysis of possible solutions of power converters is done at the beginning of this thesis, used motor and its management taking into account. Followed by design and practical implementation of mechanical and electronic components of power dynamometer utilizing DC motor with permanent magnets, using a microcomputer control system with digital signal microcontroller MC56F8023. Its software provides speed control loop with a subordinate power loop for the engine of dynamometer, software also provides the control and user communication with the operator via a terminal program running on a PC through an external D / A converter providing power waveforms and the speed of the dynamometer engine. The last part of the thesis contains the measured results with the evaluation of possible use.

## **Keywords:**

DC chopper converter, DC motor, bipolar control, unipolar control, pulse width modulation, microprocessor control system, digital signal controller MC56F8023

## Seznam použitých symbolů a zkratek:

$c\phi$	[Vs]	budící konstanta motoru
$f$	[Hz]	kmitočet střídavého napětí a proudu, kmitočet spínání pulzního měniče
$I_z$	[A]	proud zátěže
$L$	[H]	indukčnost
$L_a$	[H]	indukčnost kotevního obvodu
$M$	[Nm]	moment motoru
$M_{PM}$	[Nm]	moment pracovního mechanismu
$R$	[ $\Omega$ ]	rezistor
$T$	[s]	perioda střídavého napětí a proudu, perioda spínání pulzního měniče
$T_1$	[s]	časový interval ve kterém je spínač měniče sepnut
$T_2$	[s]	časový interval ve kterém je spínač měniče vypnut
$\tau_a$	[s]	elektromagnetická časová konstanta
$\tau_m$	[s]	elektromechanická časová konstanta
$U_d$	[V]	napětí meziobvodu, zdroje
$U_i$	[V]	vnitřní indukované napětí
$U_z$	[V]	napětí na zátěži
$u_r$	[V]	řídící napětí vstupující do bloku řízení
$z$	[-]	poměrná doba sepnutí

# Obsah

<b>1. Úvod.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Rozbor možností řešení dynamometru.....</b>	<b>2</b>
2.1 Rozdělení pulzních měničů podle pracovních kvadrantů.....	2
2.2 Způsoby řízení pulzních měničů.....	5
2.3 Způsoby řízení čtyřkvadrantových stejnosměrných pulzních měničů.....	7
<b>3. Návrh a praktická realizace dynamometru.....</b>	<b>15</b>
3.1 Regulace rychlosti a proudu dynamometru.....	15
3.2 Popis dynamometrického soustrojí.....	16
3.3 Popis mechanické části měniče.....	18
3.4 Popis desek plošných spojů a jejich elektronických obvodů.....	22
3.5 Matematický model a parametry stejnosměrného motoru.....	30
3.6 Napěťové a proudové dimenzování polovodičů.....	32
3.7 Výpočet ztrátového výkonu a návrh chladicí soustavy.....	32
3.8 Programové vybavení.....	35
<b>4. Měření na dynamometru.....</b>	<b>37</b>
4.1 Popis měření a naměřené průběhy.....	37
4.2 Srovnání výsledků měření.....	45
<b>5. Závěr.....</b>	<b>46</b>
<b>Použitá literatura.....</b>	<b>47</b>
<b>Seznam příloh.....</b>	<b>48</b>

## 1. Úvod

Cílem této diplomové práce bylo vytvoření dynamometru pro malé výkony, který by se dal použít ve výuce odborných předmětů vyučovaných katedrou elektroniky. Nejdříve je proveden rozbor možností řešení s ohledem na použitý pohon a jeho řízení. Následuje návrh a praktická realizace dynamometru pro malé výkony se stejnosměrným motorem s permanentními magnety za použití mikropočítačového řídicího systému. Poslední část práce obsahuje naměřené výsledky s vyhodnocením možností použití.



## 2. Rozbor možností řešení dynamometru

Mým úkolem je realizace dynamometru se stejnosměrným motorem s permanentními magnety za použití mikropočítačového řídicího systému. Jelikož se při výuce na katedře elektroniky využívá jako mikropočítačový řídicí systém vývojový kit se signálovým mikrokontrolérem MC56F8023, rozhodl jsem se ho ve své práci také použít a to k řízení pulzního měniče, jenž napájí elektromotor dynamometru.

Standardní dynamometr musí být schopen práce jak v motorickém, tak brzděném režimu a to pro oba směry otáčení. Tyto režimy práce dynamometru bývají zabezpečovány pomocí měničů schopných:

- snižování napětí
- zvyšování napětí
- kombinovaných, schopných snižovat i zvyšovat napětí
- pulzně řídit zatěžovací odpor

Všechny uvedené měniče využívají ke své funkci periodicky spínané polovodičové prvky. Pro brždění stejnosměrných motorů s cizím buzením se používají tři metody:

- brždění do odporu
- protiproudé brždění
- generátorické brždění

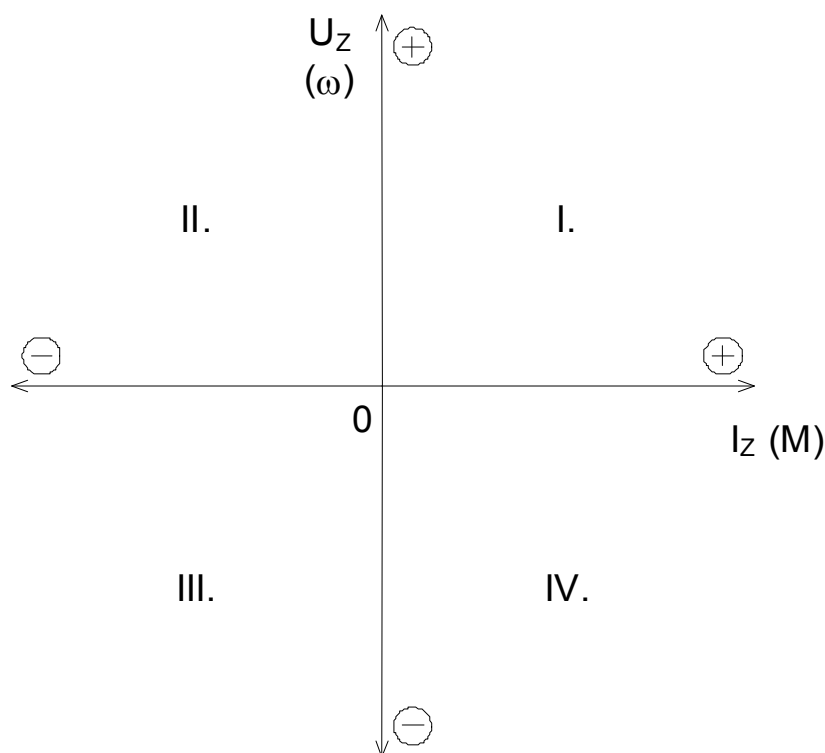
S ohledem na parametry použitého elektromotoru nelze použít brždění do odporu. Použitý elektromotor má totiž malou indukčnost kotvy. Z toho vyplývá malé indukované napětí v malých otáčkách a následně nedostatečný brzdňý moment i při nulovém brzděném odporu, jehož lze jen obtížně dosáhnout bez paralelního řazení většího počtu spínačů. Důvodem malého brzděného momentu je odpor kotevního obvodu. Dalším nedostatkem při brždění do odporu je nemožnost vytvoření brzděného momentu při stojícím rotoru.

Další dvě metody brždění a to protiproudé a generátorické lze realizovat pomocí pulzního měniče, jenž je schopen snižovat i zvyšovat napětí. Uvedeným požadavkům vyhovuje čtyřkvadrantový pulzní měnič. Při stojícím nebo pomalu se otáčejícím rotoru brzdí protiproudem a postupně se zvyšujícími se otáčkami rotoru přechází v generátorické brždění. Jeho další vlastností je samočinný přechod z motorického režimu do brzděného a naopak.

Z těchto důvodů jsem si zvolil čtyřkvadrantový pulzní měnič, jehož popis a způsoby řízení jsou obsahem následujících kapitol.

### 2.1 Rozdělení pulzních měničů podle pracovních kvadrantů

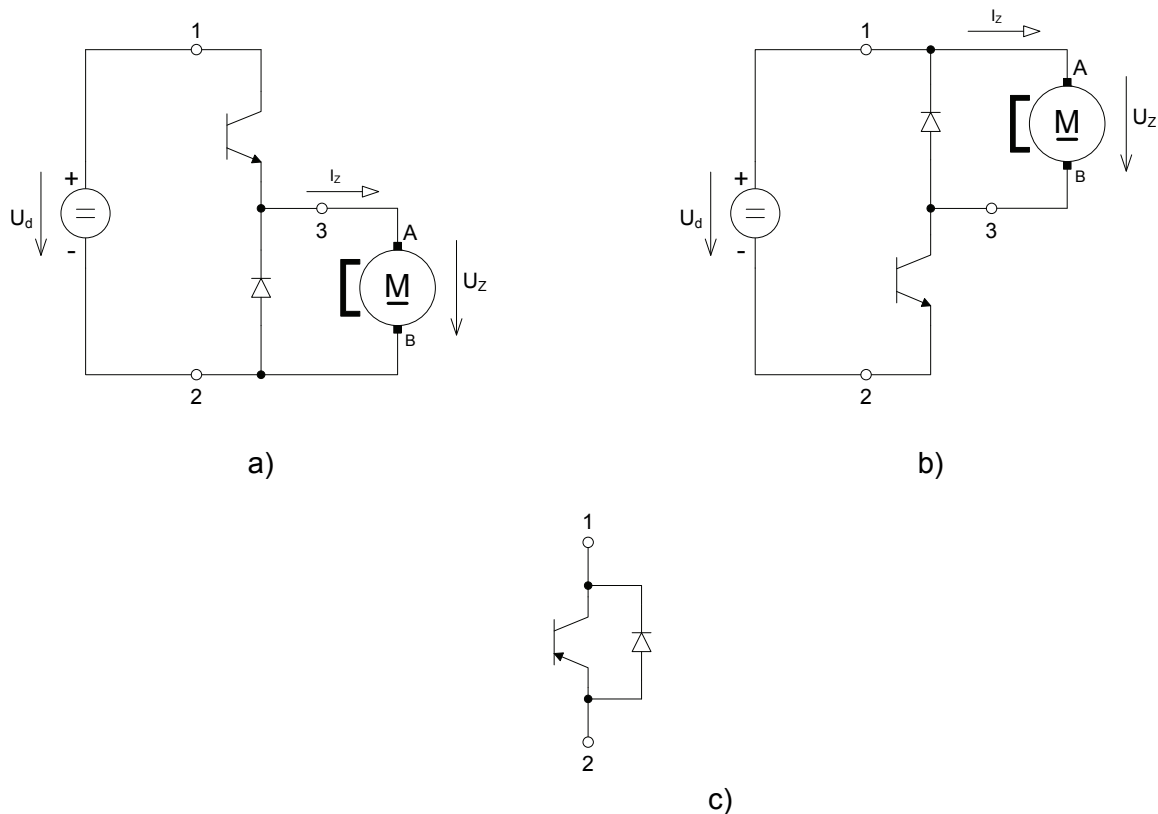
Pokud je stejnosměrný pulzní měnič zatížen stejnosměrným motorem, pak se motor jako aktivní zátěž může nacházet ve čtyřech různých režimech, odpovídajících čtyřem kvadrantům VA-roviny podle *Obr.2.1*. Aktivní zátěží rozumíme skutečnost, že náhradní schéma motoru obsahuje kromě odporu  $R$  a indukčnosti  $L$  ještě zdroj tzv. vnitřního indukovaného napětí  $U_i$ . Motor může pracovat v motorickém režimu (*I.* a *III.* kvadrant) nebo v režimu generátorickém, brzděném (*II.* a *IV.* kvadrant). Přičemž kladný směr svorkového napětí motoru  $U_z$  je třeba předem zvolit vůči pevně označeným svorkám motoru, na *Obr.2.2* jsou označeny  $A$ ,  $B$ . Kladnému směru napětí pak odpovídá kladný směr otáčení hřídele.



*Obr.2.1: Režim zátěže lze rozlišit podle umístění pracovního bodu v jednotlivých kvadrantech VA - roviny.*

Má-li proud vůči svorkovému napětí motoru směr odpovídající spotřebiči, pak se jedná o motorický režim, např. podle Obr.2.2. Má-li proud vůči napětí směr odpovídající zdroji, pak se jedná o generátorický režim. Úhlová rychlost hřídele  $\omega$  je úměrná indukovanému napětí  $U_i$  stroje (přibližně rovnému napětí  $U_z$ ) a zatěžovací moment  $M$  je úměrný proudu  $I_z$ . Pak lze rovině  $U_z - I_z$  na Obr.2.1 přiřadit analogicky rovinu  $\omega - M$  a sledovat chování pohonu z hlediska mechanických veličin na hřídeli stroje.

Obecně vždy platí, že v motorickém režimu je elektrická energie čerpána ze zdroje  $U_d$  přes pulzní měnič do motoru. V generátorickém režimu je mechanická energie zátěže konvertována ve stroji na elektrickou a ta je přes pulzní měnič čerpána zpět do zdroje  $U_d$ . Pokud je zdrojem  $U_d$  akumulátor, pak je vše v pořádku a dochází k nabíjení akumulátoru. Je-li však zdrojem síťový napáječ, potom se energie ukládá v kapacitě filtračního kondenzátoru, usměrňovací diody se uzavřou a napětí na kondenzátoru neomezeně vzrůstá. Pak je nutno paralelně ke kondenzátoru připojovat pomocí tranzistoru výkonový brzdový vybíjecí odpor, nebo energii z kondenzátoru značně složitým způsobem vracet zpět do sítě. Druhá možnost je ekonomicky náročná, proto se běžně nepoužívá. Z těchto důvodů je v této práci jako zdroj  $U_d$  použito dvou kusu olověných automobilových akumulátorů.

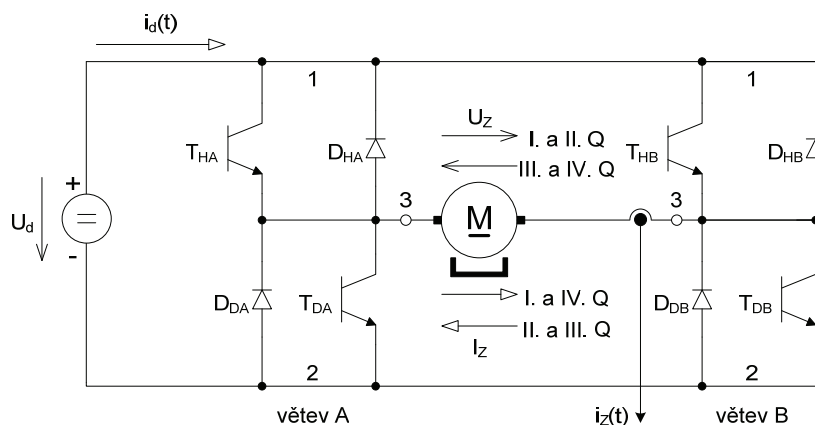


*Obr.2.2: Tranzistorový spínač jako trojpól 1-2-3: základní stavební kámen všech typů měničů.  
a) Tzv. horní spínač - zapojený jako měnič pro práci v I. kvadrantu (STEP-DOWN).  
b) Tzv. dolní spínač - zapojený jako měnič pro práci v I. kvadrantu (STEP-DOWN).  
c) Nefunkční antiparalelní kombinace T a D jako dvojpól 1-2.*

Základním stavebním kamenem všech pulzních měničů je tzv. spínač sestávající z vlastního spínacího tranzistoru a z nulové diody. Zapojení spínače je nutno chápat jako trojpól 1-2-3 na *Obr.2.2 a)* nebo *b)*. Zapojení na *Obr.2.2 a)* se nazývá horní spínač (tranzistor je nahoře), zapojení na *Obr.2.2 b)* se nazývá dolní spínač. Pomocí horního a dolního spínače lze sestavit všechny typy pulzních měničů. Je nutno zdůraznit, že antiparalelní kombinace tranzistoru a nulové diody podle *Obr.2.2 c)*, zapojená jako dvojpól 1-2, je zcela nefunkční a samostatně nepoužitelná. Tranzistor se podílí na vedení proudu vždy s protilehlou diodou, nikoliv s diodou sousední antiparalelní!

Horní a dolní spínač je topologicky totožný s nejjednodušším jednokvadrantovým pulzním měničem. Na *Obr.2.2 a,b)* pracují oba měniče v I. kvadrantu, všimněme si, že svorka A je v obou případech kladná. Obě zapojení jsou funkčně rovnocenná.

Přes ostatní zde neuvedená zapojení jednokvadrantových a dvoukvadrantových měničů se dostáváme k námi požadovanému zapojení čtyřkvadrantovému. Zapojení na *Obr.2.3* plní funkci čtyřkvadrantového pulzního měniče. Buď může pracovat jako stejnosměrný měnič nebo jako jednofázový střídač - to závisí na způsobu řízení všech čtyř tranzistorů. Toto zapojení umožňuje jak oba směry napětí (otáčení hřídele), tak i oba směry proudu (momentu), tedy motorický i brzdný režim. Všimněme si, že zapojení sestává ze dvou větví A, B, každá větev je tvořena paralelním spojením horního a dolního spínače (trojpólu)[1].



Obr. 2.3: Čtyřkvadrantový pulzní měnič.

## 2.2 Způsoby řízení pulzních měničů

Každý pulzní měnič je řízen pomocí poměrné doby sepnutí  $z$  spínače. Řízení  $z$  může být dosahováno různými způsoby:

- řízení s konstantním kmitočtem spínání
- řízení dvouhodnotové
- řízení s konstantní dobou sepnutí

### Řízení s konstantním kmitočtem spínání

se provádí tak, že se řídí  $z = T_1 / T$  při konstantním kmitočtu spínání  $f = 1/T$ . Princip řízení vyplývá z Obr. 2.4. Blok řízení Obr. 2.4 a) obsahuje generátor pilovitého napětí s konstantním kmitočtem  $f = 1/T$ . Zapnutí spínače se provádí v intervalu poklesu pilovitého napětí k nule Obr. 2.4 b). Pilovité napětí je porovnáváno s řídicím napětím  $u_r$ . V okamžiku rovnosti se provádí vypnutí spínače. Změnou  $u_r$  se mění  $z$  a tím pádem střední hodnota výstupního napětí. Tento způsob řízení je nejpoužívanější a to z důvodu nejméně náročné eliminace rušivých vlivů spínače na telekomunikační síť.



Zavedením vhodné zpětné vazby se docílí toho, že dosáhne-li skutečná hodnota proudu  $i_d$  zátěže hodnoty  $i_{dm}$  spínač měniče vypíná a proud klesá. Jakmile klesne na hodnotu  $i_{d\min}$ , spínač měniče znovu zapíná. Při udržování konstantní hodnoty  $\Delta i_d$  se v závislosti na parametrech zátěže mění  $f$  a taktéž  $z$ . Princip činnosti dvohodnotového řízení vyplývá z *Obr.2.5*. U tohoto měniče není možný chod s přerušovaným proudem. Předností dvohodnotového řízení je, že současně plní funkci kvalitního regulátoru proudu.

### **Řízení s konstantní dobou sepnutí**

pracuje tak, že je udržována hodnota  $T_1 = konst.$  a řízení poměru  $z$  se provádí změnou  $f$ . Tento způsob řízení má význam jen v případě, že spínač je řešen s tyristorem, který využívá k vypnutí komutační obvod. Sepnutím tyristoru je současně uváděn do činnosti komutační obvod tak, že vždy za stejnou dobu  $T_1$  nastane jeho vypnutí[2].

## **2.3 Způsoby řízení čtyřkvadrantových stejnosměrných pulzních měničů**

Způsoby řízení čtyřkvadrantových stejnosměrných pulzních měničů pracujících v režimu PWM lze rozdělit podle algoritmu spínání jednotlivých tranzistorů:

### **A. Podle polaritý impulsů výstupního napětí**

1. Bipolární, střídají se pravidelně impulzy obou polarit.
2. Unipolární, impulzy mají dlouhodobě pouze jednu z obou polarit.

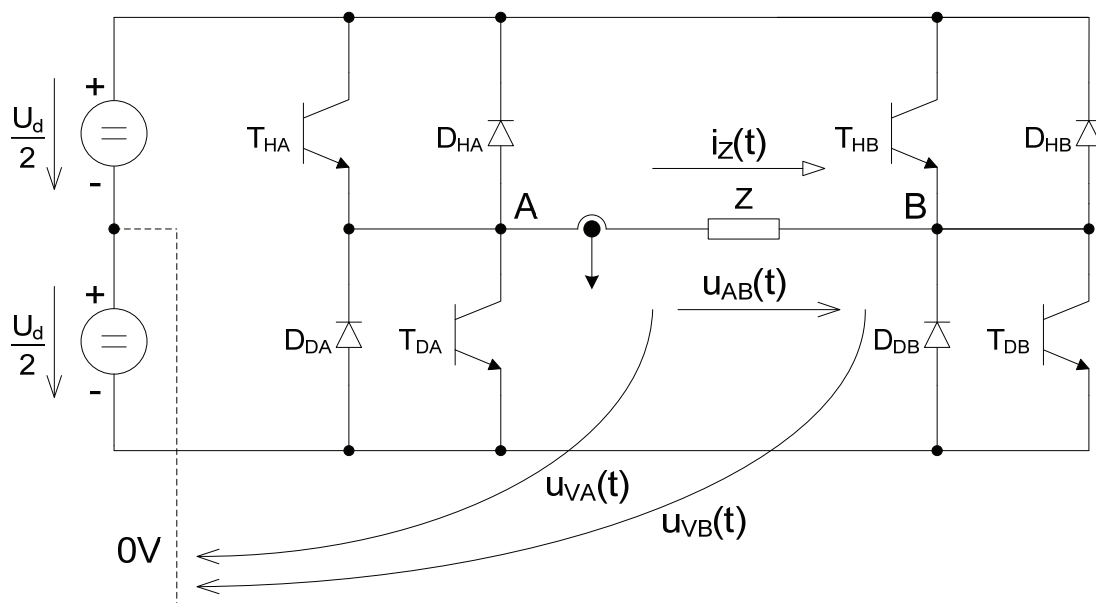
### **B. Podle způsobu spínání tranzistorů v rámci jedné větve:**

1. Preventivní spínání střídavě obou tranzistorů ve větvi v rytmu vysokofrekvenčního nosného kmitočtu, bez ohledu na aktuální směr proudu zátěže.
2. Spínání pouze jednoho tranzistoru ve větvi s ohledem na aktuální směr proudu zátěže. Druhý tranzistor je v té době trvale vypnut, protože principiálně proud daného směru vést neumí (inverzní režim) a proud protéká diodou antiparalelně připojenou k tomuto tranzistoru. Tento způsob spínání lze použít jen tehdy, pokud máme přesnou informaci o směru proudu z proudového čidla.

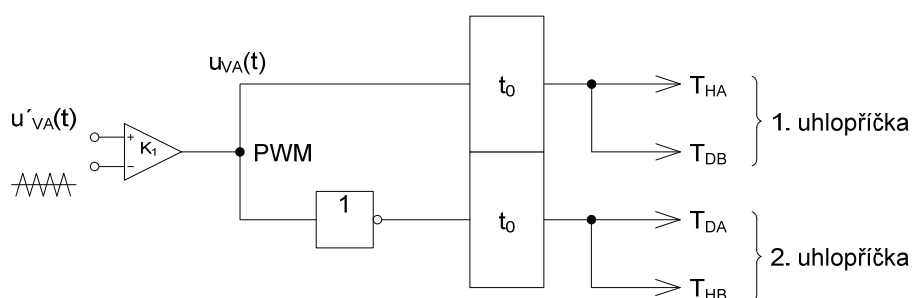
### **Bipolární řízení**

Na *Obr.2.6* je nakreslen čtyřkvadrantový celý můstek a k němu je na *Obr.2.7* znázorněn řídicí systém PWM, který lze charakterizovat jako bipolární řízení - spínání obou tranzistorů ve větvi. To znamená, že nemusí být identifikován směr proudu zátěže, protože tranzistory ve větvi jsou preventivně střídavě zapínány bez ohledu na aktuální směr proudu. Úkolem bloku  $t_0$  je zajistit

časovou prodlevu  $t_0$  (ochrannou dobu) mezi vypnutím jednoho a zapnutím druhého tranzistoru ve větvi. Ochranná doba  $t_0$  musí být s rezervou větší než celková vypínací doba použitých tranzistorů. Jinak při přepnutí dochází ke krátkodobému tvrdému zkratu mezilehlého napěťového zdroje a zničení obou tranzistorů.



Obr.2.6: Čtyřkvadrantový celý můstek.



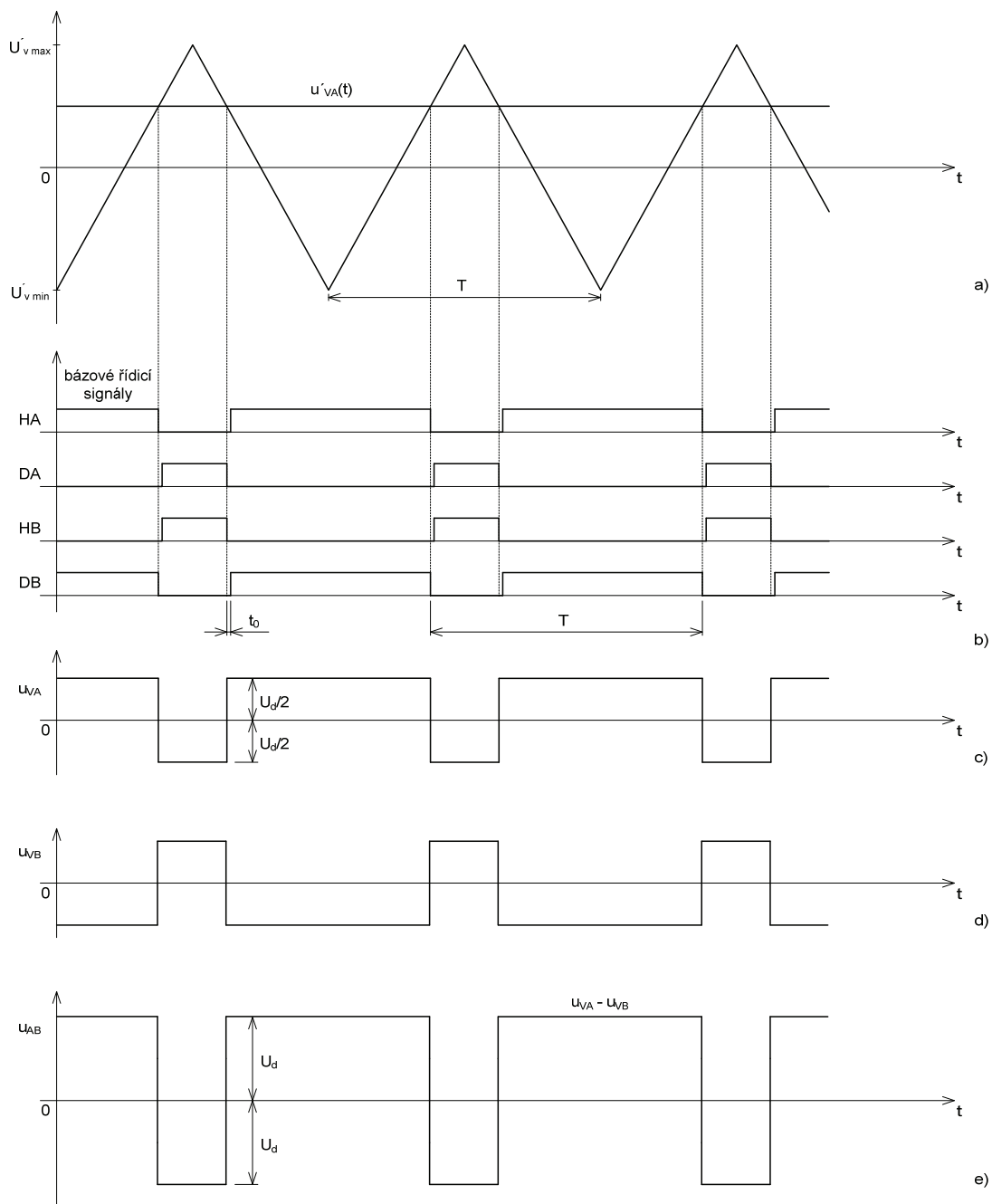
Obr.2.7: Řídicí obvody celého čtyřkvadrantového můstku. Bipolární řízení - spínání obou tranzistorů ve větvi.

Obr.2.8 znázorňuje průběhy napětí v měniči. Aplikace ochranné doby  $t_0$  do řídicích signálů všech čtyř tranzistorů vyplývá z Obr.2.8 b). Je vidět, že povel k vypnutí přichází okamžitě bez zpoždění, povel k zapnutí je zpožděn o interval  $t_0$ . Průběhy c), d), e) jsou kresleny idealizovaně, bez

uvažování ochranné doby. Z Obr.2.6 je zřejmé, že výstupní napětí na zátěži lze určit jako rozdíl obou napětí větvových.

$$u_z(t) = u_{AB}(t) = u_{VA}(t) - u_{VB}(t) \quad (2.1)$$

Napětí na zátěži je bipolární a střídavě nabývá hodnot  $\pm U_d$ .



Obr.2.8: Bipolární řízení - spínání obou tranzistorů ve větvi. Průběhy napětí v celém čtyřkvadrantovém můstku. Průběhy c), d), e) jsou kresleny idealizovaně, bez uvažování ochranné doby.



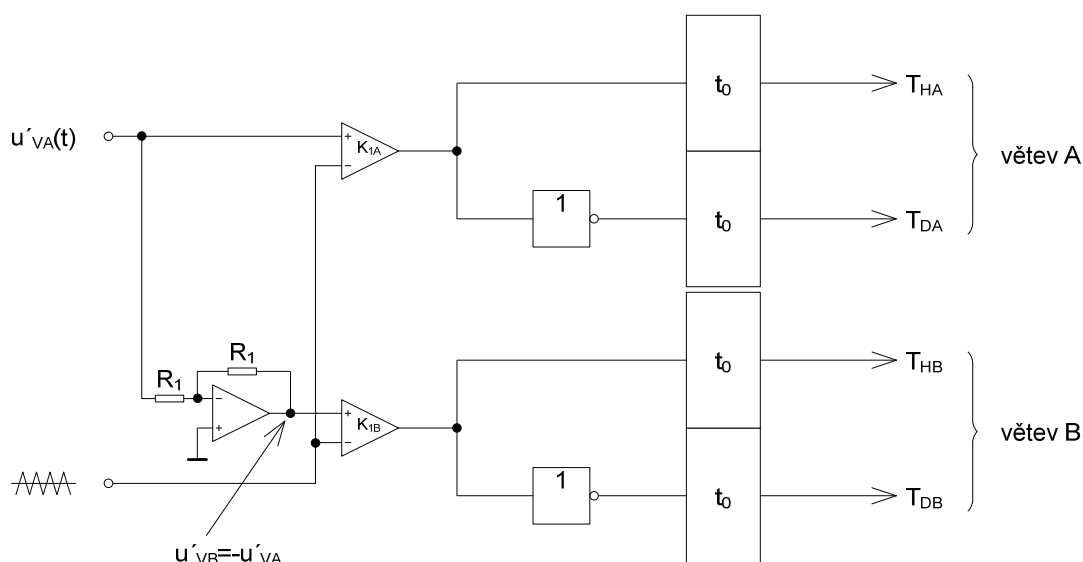
## Unipolární řízení

Na Obr.2.9 je znázorněn řídicí systém PWM, který lze charakterizovat jako unipolární řízení. Zde již nemůžeme hovořit o spínání uhlopříček, protože tranzistory jedné uhlopříčky měniče se neovládají současně, ale fázově posunuté o půlperiodu vysokofrekvenčního nosného kmitočtu. Algoritmus spínání je patrný z Obr.2.10. Je založen na tom, že s trojúhelníkovým vysokofrekvenčním nosným kmitočtem nekomparuje pouze jediný nízkofrekvenční modulační signál, ale signály dva. Tyto signály jsou vzájemně symetrické podle vodorovné nulové osy. Pro nízkofrekvenční modulační signály obou větví musí proto platit:

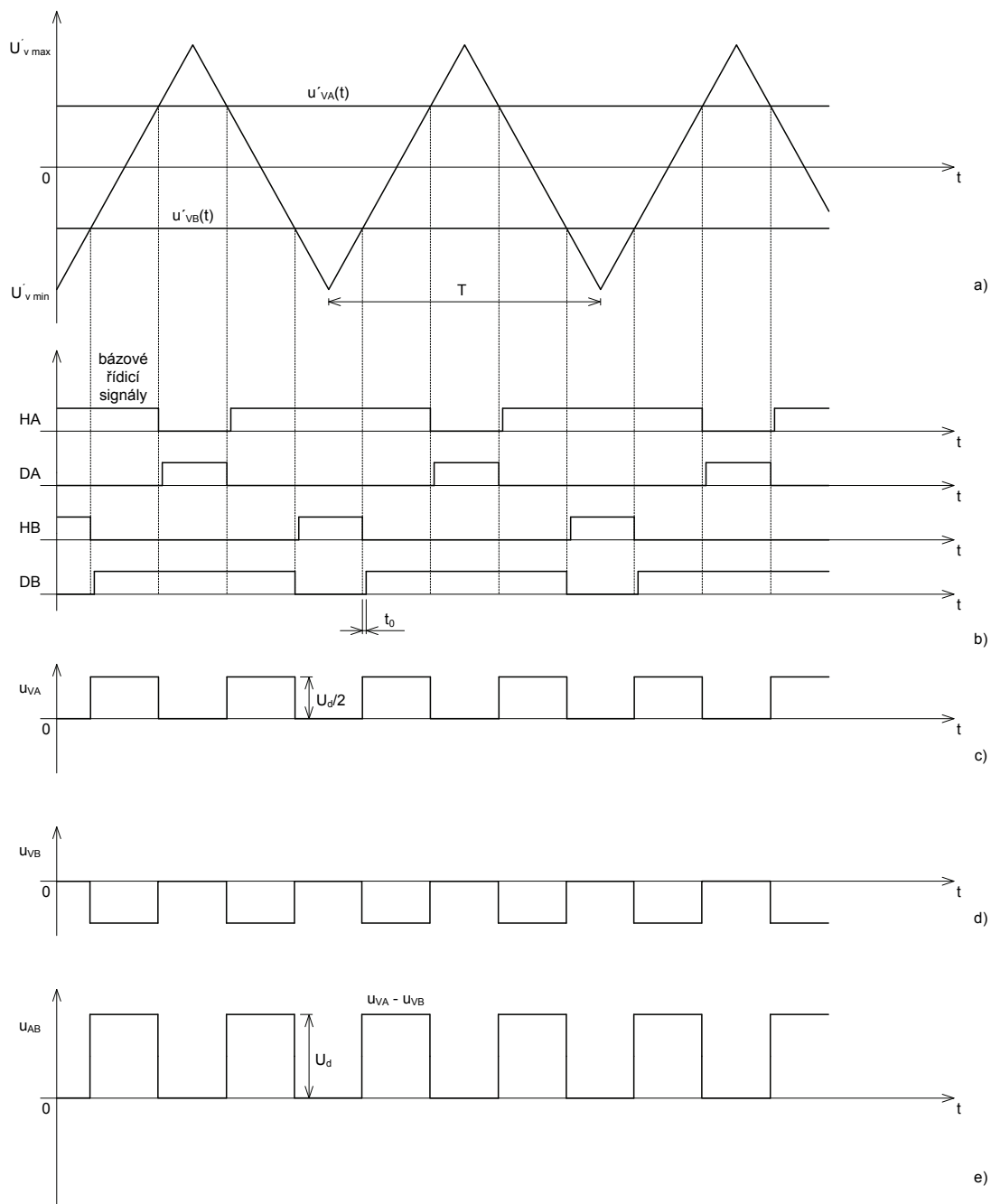
$$u'_{VB}(t) = -u'_{VA}(t) \quad (2.2)$$

Oba nízkofrekvenční signály přichází na dva samostatné šířkové modulátory (komparátory  $K_{1A}$ ,  $K_{1B}$ ). Výstup každého modulátoru je zpracováván samostatně a je jím ovládána příslušná větev A nebo B měniče. Výstupní napětí na zátěži se určí opět podle rovnice (2.1) jako rozdíl obou větrových napětí. Napětí je unipolární díky fázovému posunutí řídicích signálů v obou větvích. V I. a II. kvadrantu nabývají impulzy střídavě hodnot  $+U_d$  nebo nula, v III. a IV. kvadrantu nabývají impulzy hodnot  $-U_d$  nebo nula.

„Nutnou a postačující podmínkou pro unipolaritu výstupního napětí měniče je existence jednoho společného trojúhelníkového vysokofrekvenčního signálu a dvou různých nízkofrekvenčních signálů  $u'_{VA}(t)$ ,  $u'_{VB}(t)$  pro vstupy komparátorů  $K_{1A}$ ,  $K_{1B}$ .“



Obr.2.9: Řídicí obvody celého čtyřkvadrantového můstku. Unipolární řízení - spínání obou tranzistorů ve větvi.



Obr.2.10: Unipolární řízení - spínání obou tranzistorů ve větvi. Průběhy napětí v celém čtyřkvadrantovém můstku. Průběhy c), d), e) jsou kresleny idealizovaně, bez uvažování ochranné doby.

### Porovnání unipolárního a bipolárního řízení

Rozdíly mezi jednotlivými způsoby řízení čtyřkvadrantového pulzního měniče jsou zachyceny na Obr.2.11 ve sloupcích a), b). Význam řádků je následující:

1. ř. - *Řídicí signály* na řídicích elektrodách čtyř tranzistorů můstku. Silná čára značí povel k zapnutí, mezera povel k vypnutí tranzistoru. Značení tranzistorů souhlasí s *Obr.2.6*.
2. ř. - *Proud zátěže* - režim spjitých proudů. V obou případech má proud zátěže stejnou střední hodnotu  $I_z$ .

*Napětí na zátěži* má také v obou případech stejnou střední hodnotu  $U_z$ . Efektivní hodnota napětí na zátěži je u bipolárního řízení

$$U_{z\,ef} = U_d \quad (2.3)$$

a nezávisí na poměrné době sepnutí  $z$  spínače.

U unipolárního řízení je efektivní hodnota napětí na zátěži

$$U_{z\,ef} = U_d \sqrt{z} \quad z \in \langle 0;1 \rangle \quad (2.4)$$

a závisí na poměrné době sepnutí. Z obou rovnic plyne, že vířivé ztráty v stejnosměrném motoru jsou u řízení unipolárního vždy menší než u řízení bipolárního a nezávisí na velikosti vysokofrekvenčního nosného kmitočtu.

Dále si lze povšimnout, že v periodě  $T = 1/f$  se v případě b) vyskytuje dvojnásobný počet napěťových pulzů. Zdvojení kmitočtu na zátěži proti pracovní frekvenci  $f$  tranzistorů je další velká výhoda unipolárního řízení. Snižují se přepínací ztráty na tranzistorech (mohou pracovat na polovičním kmitočtu proti bipolárnímu řízení) a také se snižuje zvlnění proudu zátěže.

3. ř. - *Kolektorový proud tranzistoru*  $T_{HA}$ . V případě unipolárního řízení je menší špičková hodnota proudu proti bipolárnímu řízení. Střední hodnota pulzů je v obou případech stejná. Zanedbáme-li tvarové rozdíly na vrcholech impulzů, vidíme, že i efektivní hodnota kolektorového proudu je prakticky stejná (pokud není zvlnění příliš velké).
4. ř. - *Proud nulové diody*, která spolupracuje s tranzistorem  $T_{HA}$ , tj. dolní diody  $D_{DA}$ . Platí pro ní vše jako v 3. ř..
5. ř. - *Proud mezilehlého obvodu* (ze zdroje  $U_d$  do měniče). Střední hodnota proudu je v obou případech stejná a je určena činným příkonem měniče, odebíraným ze zdroje konstantního napětí  $U_d$ . Nahrádíme-li šikmé vrcholy proudových pulzů pravoúhlými impulzy  $\pm I_z$ , pak lze pro bipolární systém řízení určit efektivní hodnotu mezilehlého proudu

$$I_{d\,ef} = I_z \quad (2.5)$$

Efektivní hodnota nezávisí na poměrné době sepnutí  $z$  spínače.

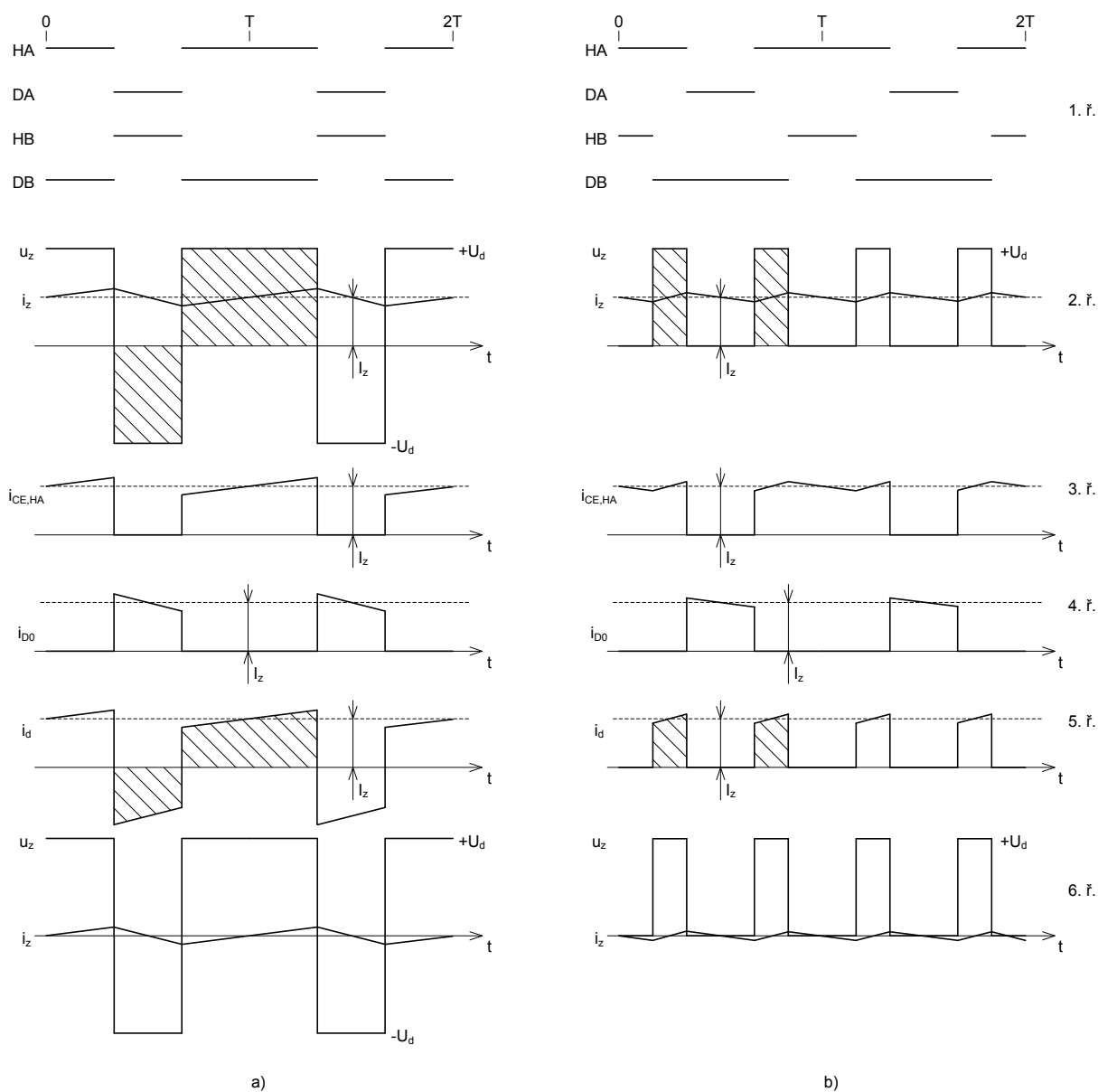
Pro unipolární systém řízení, nahradíme-li pulzy pravoúhlými průběhy o výšce  $+I_z$ , bude

$$I_{d\,ef} = I_z \sqrt{z} \quad z \in \langle 0;1 \rangle \quad (2.6)$$

což je podstatně méně než u bipolárního systému řízení a lze to považovat za výhodu.

6. ř. - *Proud zátěže* při malých zatěžovacích proudech. Svorkové napětí motoru je v každém okamžiku pevně definováno a proud má možnost plynule procházet nulou. Při poklesu na nulu (míněno v obou směrech) teče proud některou nulovou diodou a po průchodu nulou začíná téci

sousedním antiparalelně připojeným tranzistorem, který má na své řídicí elektrodě přiveden  
zapínací impuls[1].



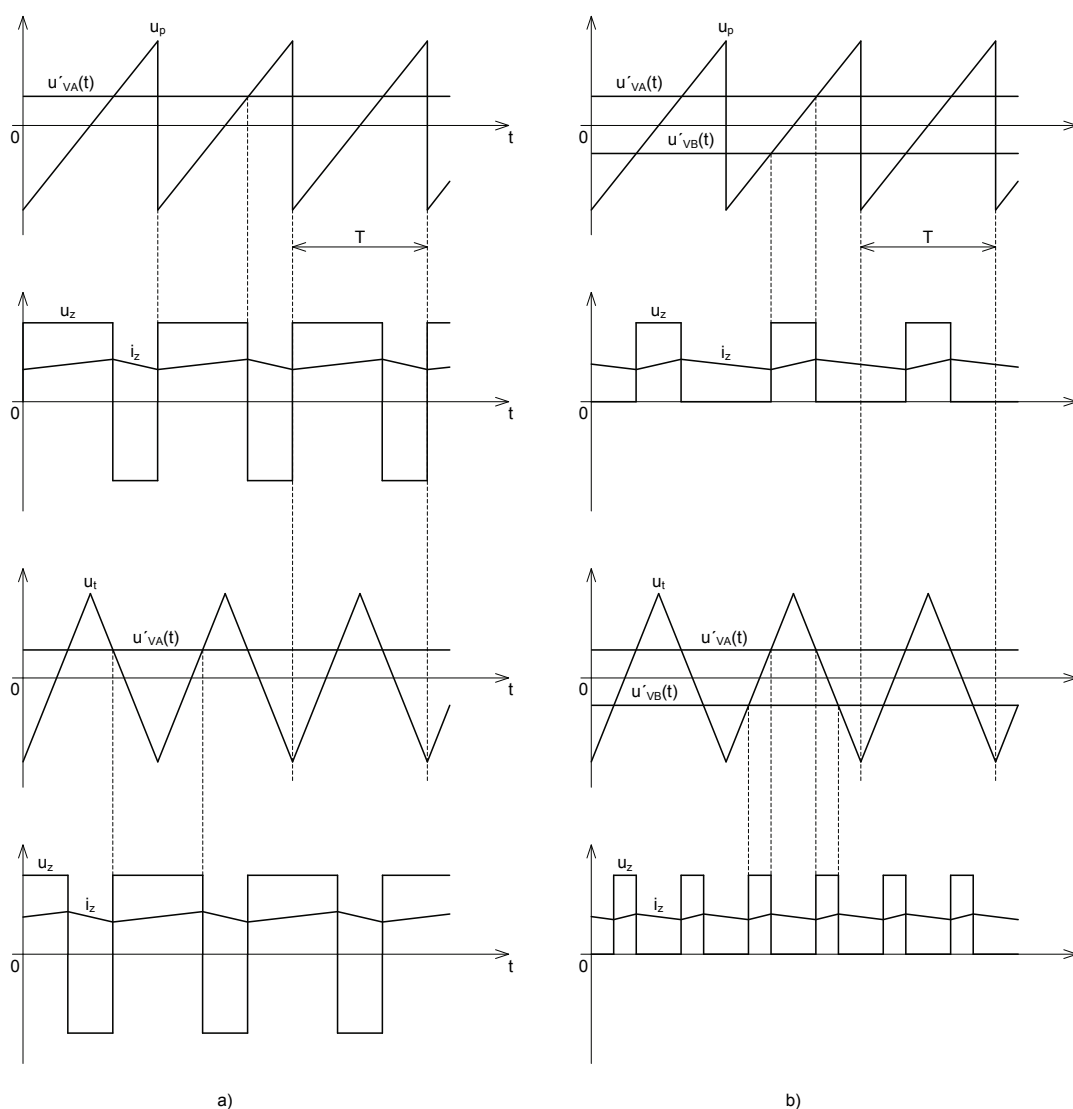
Obr.2.11: Řízení čtyřkvadrantového pulzního měniče.  
a) Bipolární řízení - spínání obou tranzistorů ve větvi.  
b) Unipolární řízení - spínání obou tranzistorů ve větvi.

## Porovnání unipolárního a bipolárního řízení podle tvaru vysokofrekvenčního nosného kmitočtu

Průběhy napětí a proudu zátěže u obou systému řízení při různých tvarech vysokofrekvenčního nosného kmitočtu jsou na Obr.2.12.

Při bipolárním způsobu řízení Obr.2.12 a) lze vidět, že není rozdíl mezi tím, zda se jako vysokofrekvenční nosný signál použije pilovitý nebo trojúhelníkový signál.

U unipolárního způsobu řízení Obr.2.12 b) tomu tak není. Lze si povšimnout, že v periodě  $T = 1/f$  se v případě použití trojúhelníkového vysokofrekvenčního nosného signálu vyskytuje dvojnásobný počet napěťových pulzů, než při použití pilovitého vysokofrekvenčního nosného signálu. Zdvojení kmitočtu na zátěži proti pracovní frekvenci  $f$  tranzistorů je velká výhoda. Snižují se přepínací ztráty na tranzistorech (mohou pracovat na polovičním kmitočtu) a také se snižuje zvlnění proudu zátěže.



Obr.2.12: Průběhy napětí a proudu zátěže při různých tvarech vysokofrekvenčního nosného kmitočtu.

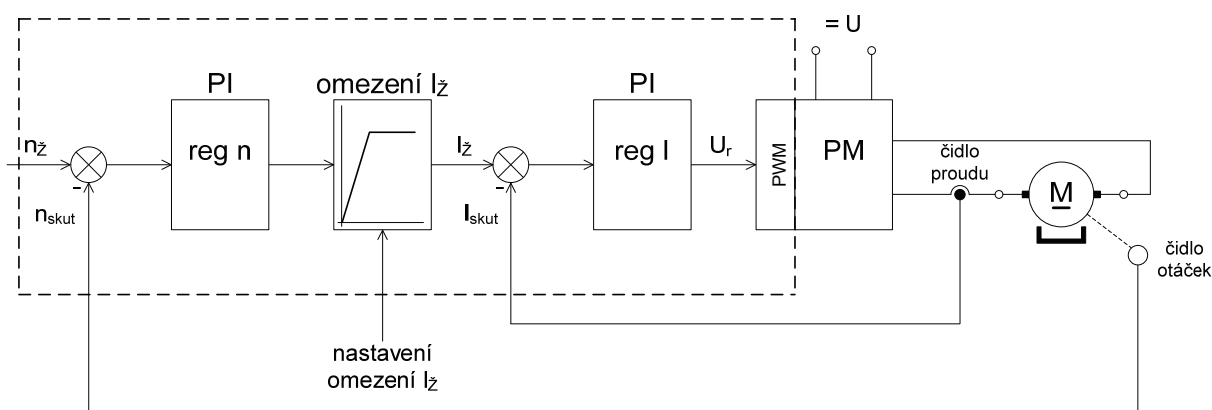
a) Bipolární řízení - spínání obou tranzistorů ve větvi.

b) Unipolární řízení - spínání obou tranzistorů ve větvi.

### 3. Návrh a praktická realizace dynamometru

#### 3.1 Regulace rychlosti a proudu dynamometru

Pro regulaci rychlosti a proudu dynamometru byla zvolena regulace rychlosti s podřazenou smyčkou proudu, která se vyznačuje dobrou dynamikou regulace. Schéma této struktury je uvedeno na Obr.3.1.



Obr.3.1: Struktura regulace rychlosti s podřazenou smyčkou proudu.

Regulátor rychlosti zadává žádanou hodnotu proudu pro regulátor proudu. Žádaná hodnota proudu je tedy závislá na odchylce mezi žádanou a skutečnou rychlostí ( $n_z - n_{skut}$ ). Skutečnou hodnotu proudu měří čidlo proudu, zařazené v kotevním obvodu stejnosměrného motoru dynamometru. Výstupní veličinou regulátoru proudu je řídicí napětí, které se zavádí do bloku PWM pro řízení pulzního měniče.

V motorickém režimu jsou zadány požadované otáčky  $n_z$  a pomocí  $I_z$  se nastaví maximální moment motoru dynamometru.

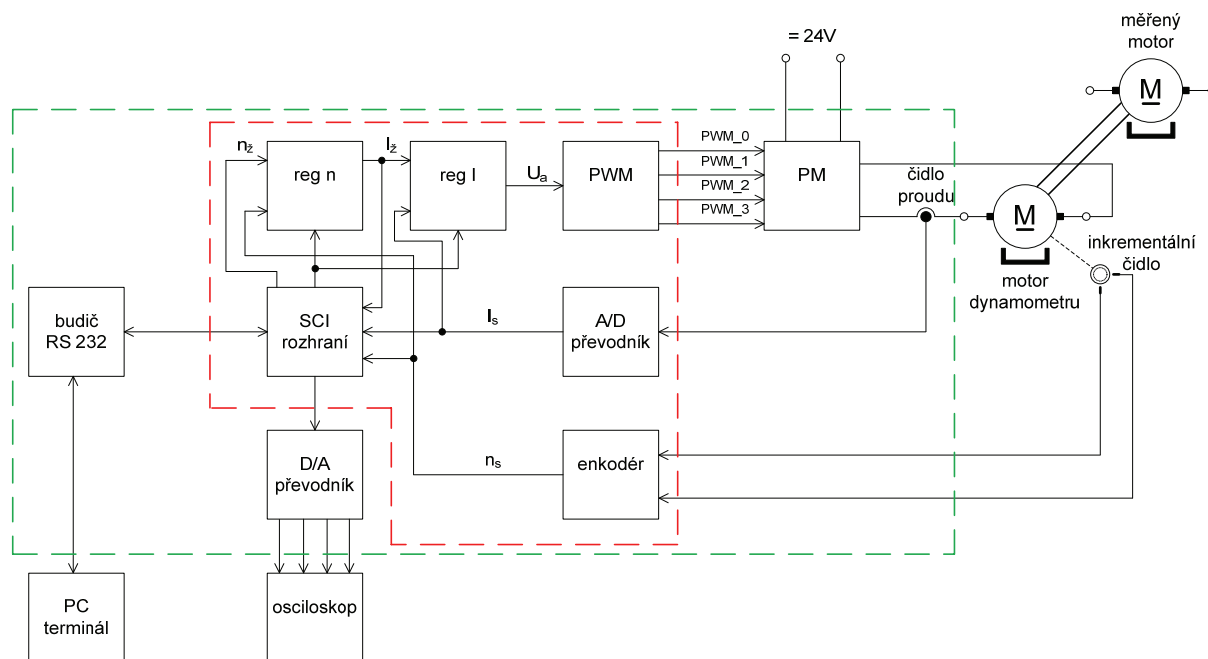
V brzděném režimu jsou zadány požadované otáčky  $n_z = 0$  a nastavením omezení  $I_z$  se reguluje velikost brzděného momentu motoru dynamometru.

Ohraničená část regulační struktury je vytvořena programově v signálovém mikrokontroléru.

#### Mikropočítačová regulace

Mikropočítačová regulace se v porovnání s regulací analogovou vyznačuje nejen vyšším komfortem, vyšší spolehlivostí a menšími nároky na údržbu zařízení. Také případné změny a úpravy se realizují mnohem snáz než u zařízení analogových.

Mnou vytvořený řídicí mikropočítačový systém je na Obr.3.2.



Obr.3.2: Blokové schéma řídicího mikropočítačového systému dynamometru..

Jádrem řídicího systému je průmyslově vyráběný vývojový kit se signálovým mikrokontrolérem MC56F8023. Toto jádro, skládající se z vlastního signálového mikrokontroléru a jeho periferních obvodů, je na obrázku ohraničeno červeně. Výjimku tvoří bloky „reg n“ a „reg I“, což jsou programové moduly.

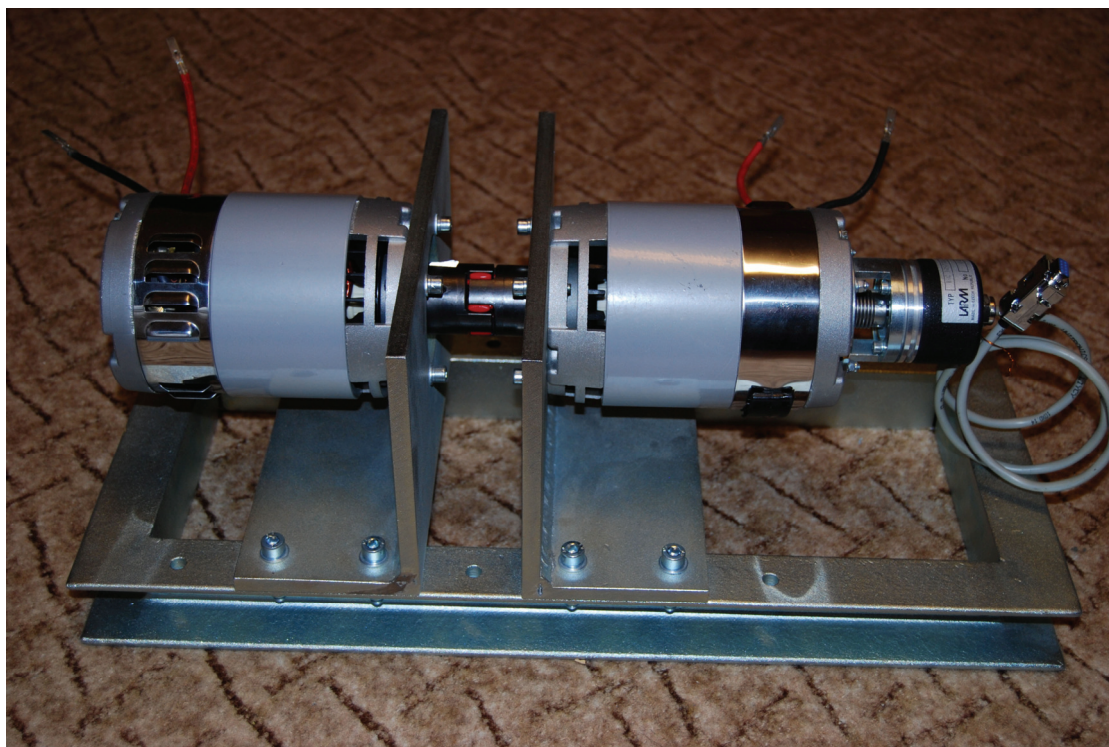
Bloky ohraničené zeleně jsou vytvořeny fyzicky na elektronických deskách plošných spojů a jsou umístěny spolu s vývojovým kitem ve skříni, jejíž podstatnou část tvoří pulzní měnič „PM“. Tato část obsahuje čidlo proudu, což je měřicí převodník proudu s hallovou sondou, dále pak D/A převodník spolu s budičem sběrnice RS 232.

K této skříni se z vnějšku mimo napájecích zdrojů připojuje dynamometrické soustrojí, tvořené motorem dynamometru s připojeným inkrementálním čidlem a měřený elektromotor. Sledování průběhů výstupních napětí z D/A převodníku zajišťuje připojený osciloskop, na němž lze sledovat průběhy důležitých veličin.

Ovládání celého dynamometru se děje prostřednictvím PC, na němž běží terminálový program.

### 3.2 Popis dynamometrického soustrojí

Pohled na celkovou sestavu dynamometrického soustrojí je na Obr.3.3.



Obr.3.3: *Dynamometrické soustrojí.*

Jak je z obrázku patrné, základ soustrojí tvoří ocelový rám svařený z U profilu. Na rámu je řada montážních otvorů, jež by měla případně umožnit montáž jiného zkoušeného motoru. K rámu jsou pomocí šroubů přichyceny dva držáky elektromotorů. Výše popsané kovové díly mají povrchovou úpravu provedenu elektrolytickým zinkováním. Výkres ocelového rámu a držáků elektromotorů je v příloze č. 4. Na držácích elektromotorů jsou přišroubovány dva stejnosměrné elektromotory s permanentními magnety MP 80S/2 od firmy AMER. Levý elektromotor plní funkci zkoušeného elektromotoru a pravý, s připojeným inkrementálním čidlem, plní funkci motoru dynamometru. Technické údaje elektromotorů jsou uvedeny v dalším textu. Pro spojení elektromotorů je použita pružná spojka GH velikosti 19/24 s pružným elementem 98 Shore. Při její montáži je třeba podle návodu výrobce dodržet mezi čely obou polovin spojky vzdálenost 16 mm, aby pružný element měl potřebný pracovní prostor. Tuto vzdálenost upravujeme axiálním posuvem polovin spojek po hřídelích elektromotorů.

K elektromotoru, plnícímu funkci motoru dynamometru, je pomocí držáku snímače IRC30x připevněno inkrementální čidlo IRC 305/1024 PA. Spojení rotoru motoru dynamometru s osou inkrementálního čidla je realizováno pomocí vlnovcové spojky SV9 Ø 6/8 mm a spojovací hřídelky (výkres v příloze č. 4), našroubované přímo do rotoru motoru dynamometru. Jelikož tento rotor nebyl původně vyveden z elektromotoru z obou stran, bylo nutno provrtat zadní víko elektromotoru, dále do osy rotoru vyvrtat otvor a následně do něj vyřezat závit pro připojení spojovací hřídelky, nesoucí vlnovcovou spojku. Výrobu spojovací hřídelky s broušeným povrchem bylo nutno zadat strojírenské firmě. Montáž inkrementálního snímače k zamezení nepřiměřeného namáhání vlnovcové spojky a samotného snímače je nutno provést přesně dle následujícího postupu.

#### **Postup montáže inkrementálního čidla**

- 1 - Po našroubování spojovací hřídelky na rotor je nutno motor dynamometru celkově sestavit,



ovšem zatím bez držáků uhlíků.

- 2 - Poté se na spojovací hřídelku zvnějšku nasune pro tento účel vyrobený montážní vymezovací kroužek, jenž je přiložen jako součást dynamometrického soustrojí.
- 3 - Následně se k zadnímu víku motoru dynamometru přišroubuje držák inkrementálního snímače a víko se opět z motoru dynamometru demontuje.
- 4 - Po upevnění držáků uhlíků se motor dynamometru konečně zkompletuje.
- 5 - Vymezovací kroužek se axiálně vysune ze spojovací hřídelky a po otočení o 90° se vyjme z prostoru držáku inkrementálního snímače.
- 6 - Nyní se na spojovací hřídelku zatím volně nasune vlnovcová spojka.
- 7 - Inkrementální snímač se volně zasune do vlnovcové spojky a definitivně se přišroubuje ke svému držáku.
- 8 - Axiálním posuvem vlnovcové spojky nastavíme minimální mezeru mezi víkem motoru dynamometru a spojkou definitivně zajistíme nejdříve na spojovací hřídelce a poté na ose inkrementálního čidla.

Dynamometrické soustrojí se k napájecím zdrojům připojuje prostřednictvím vodičů opatřených noži konektorů FASTON. Inkrementální snímač je připojen konektorem CANON 9 s dutinkami, jenž je zapojen způsobem obvyklým u ostatních obdobných zařízeních užívaných na katedře elektroniky VŠB - TU Ostrava.

### 3.3 Popis mechanické části měniče

Základním materiálem skříně pulzního měniče *Obr.3.4* je leštěný nerezový plech o tloušťce 0,8 mm. Z něj je vyroben jak spodní díl skříně pulzního měniče, jehož rozvinutý tvar je v příloze č. 5, tak i horní díl, který je na *Obr.3.4*. Uvedené díly byly vyřezány laserem a poté ohnuty na ohraňovacím lisu. Pomocí laseru byly také vytvořeny nápisy jak na čelním panelu *Obr.3.5*, tak i na zadním panelu *Obr.3.6*. Dalším dílem skříně je chladicí tunel *Obr.3.7*, který je na jednom konci upevněn na vnitřní stranu zadního čela skříně a z druhé strany pomocí třmenu k vnitřní straně čelního panelu skříně. Materiálem chladicího tunelu a třmenu je ocelový plech, jenž je galvanicky pozinkován. Mezi chladicím tunelem a vnitřní stranou čelního panelu je namontován ventilátor, zajišťující nucený oběh vzduchu. Ventilátor nasává chladicí vzduch přes mřížku v čelním panelu a žene ho do chladicího tunelu. V místě zaústění ventilátoru do tunelu je ze tří stran ponechány malé mezery mezi rámečkem ventilátoru a vnitřní stranou stěny tunelu. Těmito mezerami je podtlakově přisáváno malé množství vzduchu z vnitřního prostoru skříně. Vzduch, který je takto odsáván, se do prostoru skříně vstupuje bočními otvory ve víku skříně *Obr.3.4*. Všechn nasátý vzduch poté vystupuje z chladicího tunelu mřížkou v zadním čele skříně *Obr.3.6*. Popsané proudění vzduchu zajišťuje dostatečné chlazení jak výkonových prvků namontovaných v tunelu, tak i desek s elektronikou umístěných nade dnem skříně. Toto uspořádání nuceného chlazení zajišťuje maximální možnou ochranu skříně elektroniky proti drobným padajícím předmětům. Stejně tak je chráněno i dno skříně, v němž není jediný otvor.

Na čelním panelu skříně *Obr.3.5*, jehož výkres je v příloze č. 5, se nachází hlavní síťový vypínač s označením „SÍŤ“, dále přístrojové zdířky „NAPÁJENÍ“ pro připojení stejnosměrného napájecího napětí pro napájení výstupního okruhu měniče a zdířky „VÝSTUP“ pro připojení motoru dynamometru. Dále je na předním panelu umístěn páčkový přepínač „BUZENÍ“, „ZAP“, „VYP“ se signalizační zeleně svítící LED diodou, jejíž svit v poloze přepínače „BUZENÍ“ v poloze „ZAP“ signalizuje, že blokování výkonové části měniče bylo zrušeno. Konektor „EXTERNÍ ŘÍZENÍ“, jenž zabezpečuje připojení vnějších ovládacích signálů PWM je typu CANON 9 s dutinkami, se také nachází na předním panelu. Na tento konektor je také vyvedeno napětí z měřicího odporu připojeného

k proudovému převodníku. Všechny tyto ovládací prvky kromě síťového vypínače jsou orámovány a nazvány „VÝKONOVÁ ČÁST MĚNIČE“. V pravé části čelního panelu se ještě nachází čtyři konektory CANON 9. Dva z nich, s názvy „IRC“ a „ANALOG. VSTUPY“, jsou osazeny kolíky a zbylé dva, označené „RS 232“ a „ANALOG. VÝSTUPY“, jsou osazeny dutinkami.

Na zadním panelu skříně *Obr.3.6*, jehož výkres je v příloze č. 5, je umístěno pojistkové pouzdro osazené pojistkou 100 mA pro jištění transformátorů napájecích zdrojů. Síťové napájecí napětí 230V AC 50Hz je přivedeno do skříně přívodkou s vestavěným odrušovacím filtrem.

Elektronika pulzního měniče je rozdělena na následující podsestavy:

- deska napájecích zdrojů DNM-PK-ZD
- deska budících obvodů výkonové části měniče DNM-PK-VCM
- deska analogových vstupů, výstupů a komunikace DNM-PK-AND

Deska napájecích zdrojů je umístěná v levé části skříně pulzního měniče *Obr.3.8*. Deska budících obvodů výkonové části je umístěná pod chladicím tunelem viz *Obr.3.8* a *Obr.3.12* ve střední části skříně. V tunelu, jak již bylo uvedeno, se nachází měřicí převodník výstupního proudu a spínací výkonové tranzistory, které jsou připevněny na dvou hliníkových chladičích, procházejících téměř celou délkou chladicího tunelu, v jehož přední části je ventilátor. Profily chladičů jsou vidět pod mřížkou výstupu chladicího vzduchu na *Obr.3.6*.

V pravé části skříně pulzního měniče je umístěna deska analogových vstupů, výstupů a komunikace - viz *Obr.3.12*. Nad touto deskou je na distančních sloupcích upevněn vývojový kit se signálovým mikrokontrolérem. Veškeré desky jsou mezi sebou propojené plochými kabely s konektory PSH. Silové přívody od přístrojových zdírek do tunelu jsou provedeny měděnými lanky o průřezu 4 mm<sup>2</sup> a propojení výkonových tranzistorů v tunelu je realizováno měděnými lanky o průřezu 2,5 mm<sup>2</sup>. Všechny průchody kabelů a vodičů stěnou tunelu jsou opatřeny gumovými vývodkami.

Všechny tři desky plošných spojů jsou vyrobeny jako jednostranné plošné spoje, následně pocínované, ručně osazené a zapájené. Konečná povrchová úprava je provedena lakováním ochranným lakem PLASTIK 70, jenž je v případě oprav snadno propájitelný. Takto vyrobené desky plošných spojů jsou upevněny nad dno skříně na distančních sloupcích o výšce 10 mm, čímž je zajištěná dostatečná vzdálenost vodiivé vrstvy spojů i pájecích bodů od kostry skříně, která je chráněna před nebezpečným dotykovým napětím připojením na ochranný vodič PE.

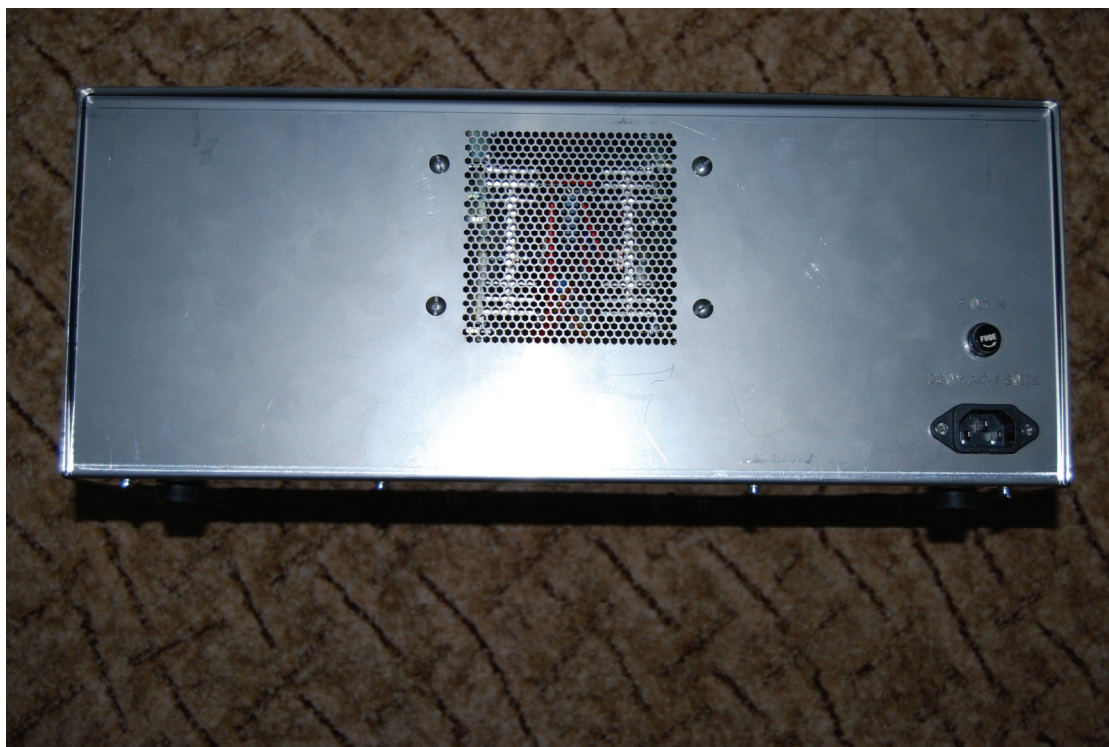


Obr.3.4: Skříň pulzního měniče.

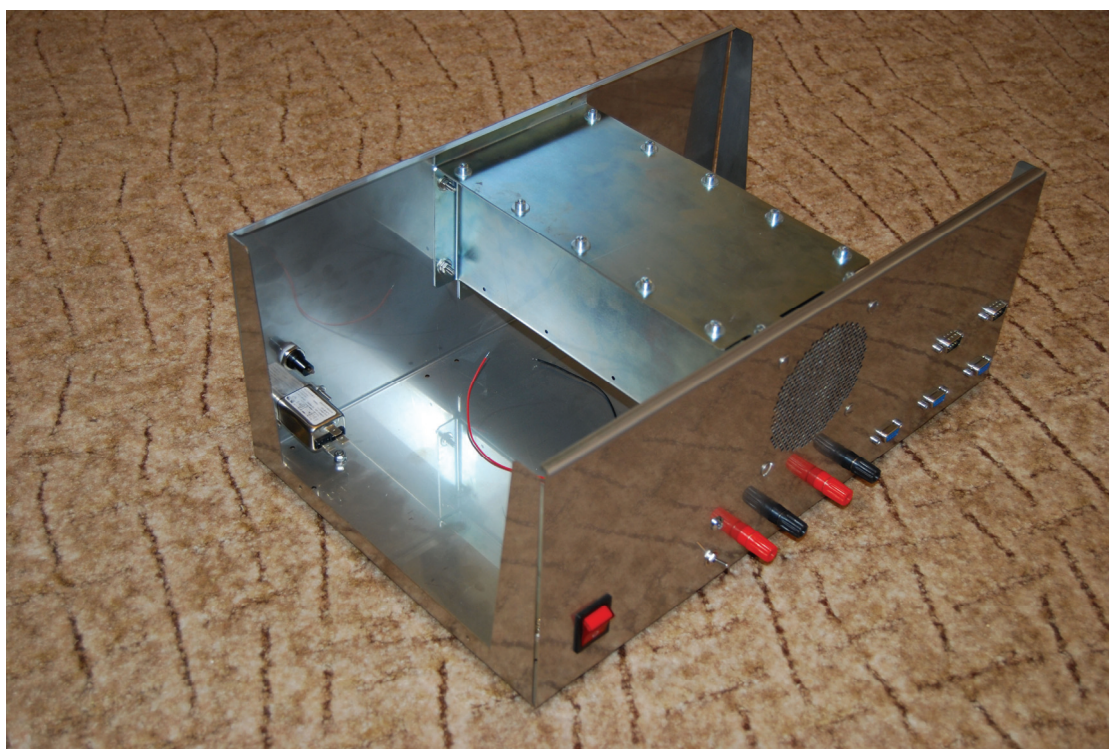


Obr.3.5: Čelní pohled na skříň pulzního měniče.





Obr.3.6: *Zadní pohled na skříň pulzního měniče.*

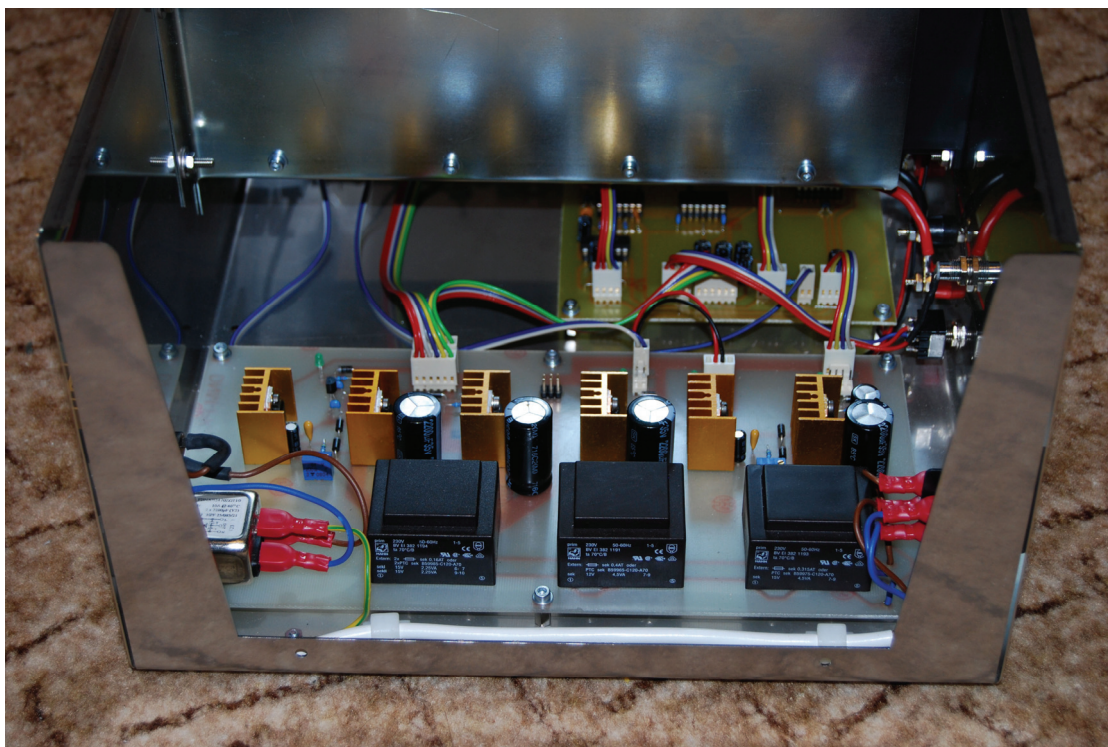


Obr.3.7: *Pohled do smontované skříně pulzního měniče s osazeným čelním a zadním panelem.*

### 3.4 Popis desek plošných spojů a jejich elektronických obvodů

#### Deska napájecích zdrojů DNM-PK-ZD

Napájení elektronických obvodů dynamometru nízkým bezpečným napětím zajišťuje jediná deska síťového zdroje, jejíž podstatnou část tvoří tři napájecí transformátorky 4,5 VA (viz Obr.3.8), jež jsou zastrčíknuty v samozhášivé plastické hmotě a jsou výrobcem uzpůsobeny k zapájení přímo do desky plošného spoje, do něž je pro jejich malou hmotnost není nutno dodatečně mechanicky upevňovat. Schéma napájecích zdrojů, výkres desky napájecích zdrojů, osazovací plán desky tvoří přílohu č. 1.



Obr.3.8: Pohled do skříně pulzního měniče ze strany napájecích zdrojů.

Síťové napětí 230 V AC 50 Hz je do desky zdroje DNM-PK-ZD přivedeno přívodkou s vestavěným odrušovacím filtrem přes tavnou pojistku. Přívodka i pojistkové pouzdro jsou umístěny na zadní stěně nerezové skříně měniče dynamometru.

Použitých sedm parametrických integrovaných stabilizátorů v obvyklém zapojení (šest z nich je opatřeno vlastním chladičem) dodává všechna potřebná napájecí napětí jednak pro na desce DNM-PK-AND umístěný vývojový kit se signálovým mikrokontrolérem a také pro všechny rozšiřující elektronické obvody, jež jsou umístěny na deskách DNM-PK-VCM a DNM-PK-AND. Zdrojová deska obsahuje i ručně nastavitelný zdroj napětí pro napájení ventilátoru v chladícím tunelu výkonových spínacích tranzistorů.

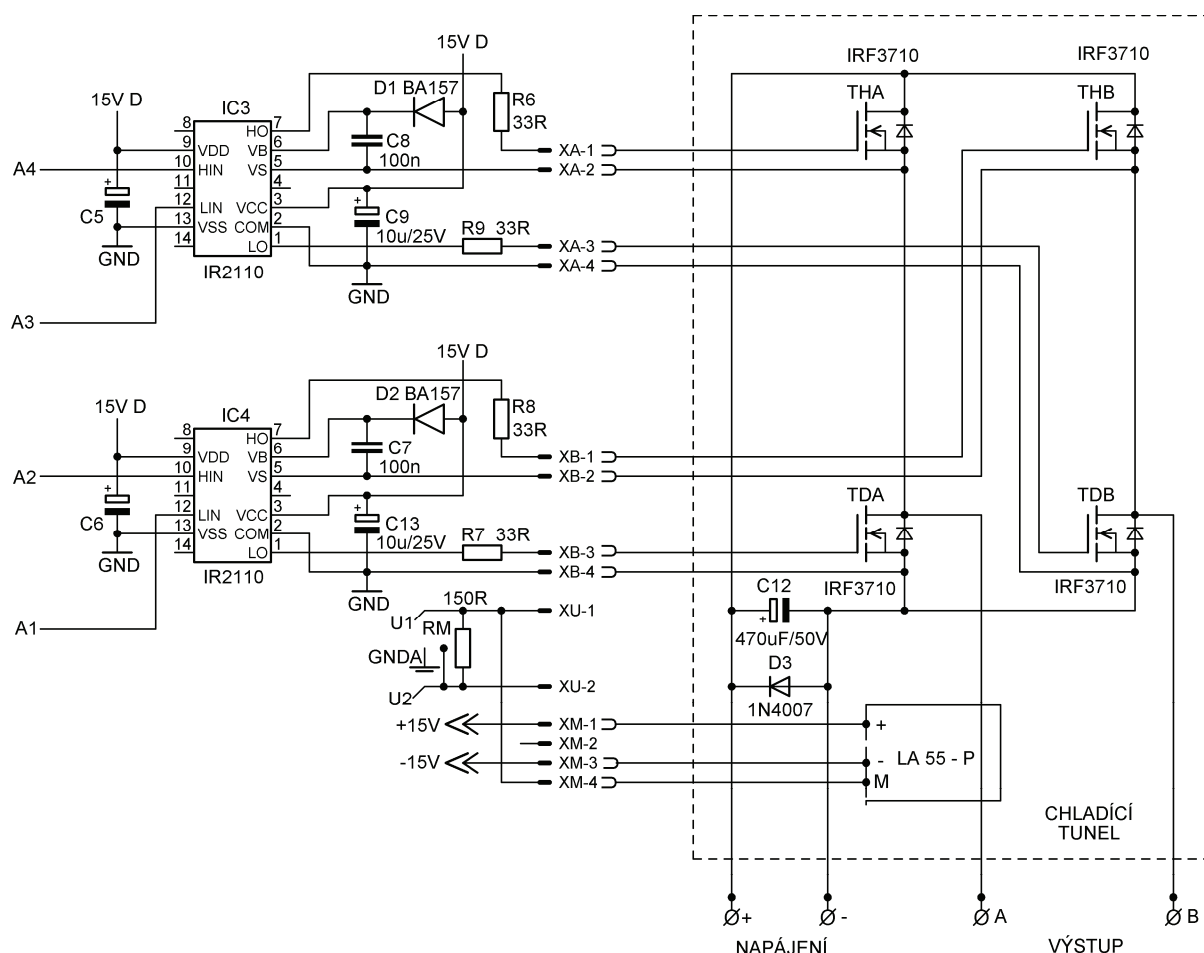


U nastavitelných zdrojů jsou použity víceotáčkové cermentové trimry. Tyto zdroje jsou také opatřeny dvojicí diod, které při odpojení síťového napětí zajišťují vybití filtračních elektrolytů mimo strukturu integrovaného obvodu stabilizátoru a chrání jej tak proti případnému poškození.

Přítomnost napětí v šesti výstupních větvích zdroje je signalizována svitem miniaturních zelených LED diod na výstupech. Tyto výstupy jsou proti napětím s opačnou polaritou chráněny diodami 1N4007, zapojenými v nevodivém směru. Všechna výstupní napětí z desky zdrojů DNM-PK-ZD jsou vyvedena konektory PSH s rozdílným počtem nožů, opatřenými zámkem proti otočení konektoru, a tak je při troše pozornosti účinně zabráněno nechtěné záměně nebo přepólování při manipulaci s napájecími kabely.

### Deska budících obvodů výkonové části měniče DNM-PK-VCM

Úplné schéma výkonové části měniče, výkres desky výkonové části měniče a osazovací plán desky tvoří přílohu č. 2.



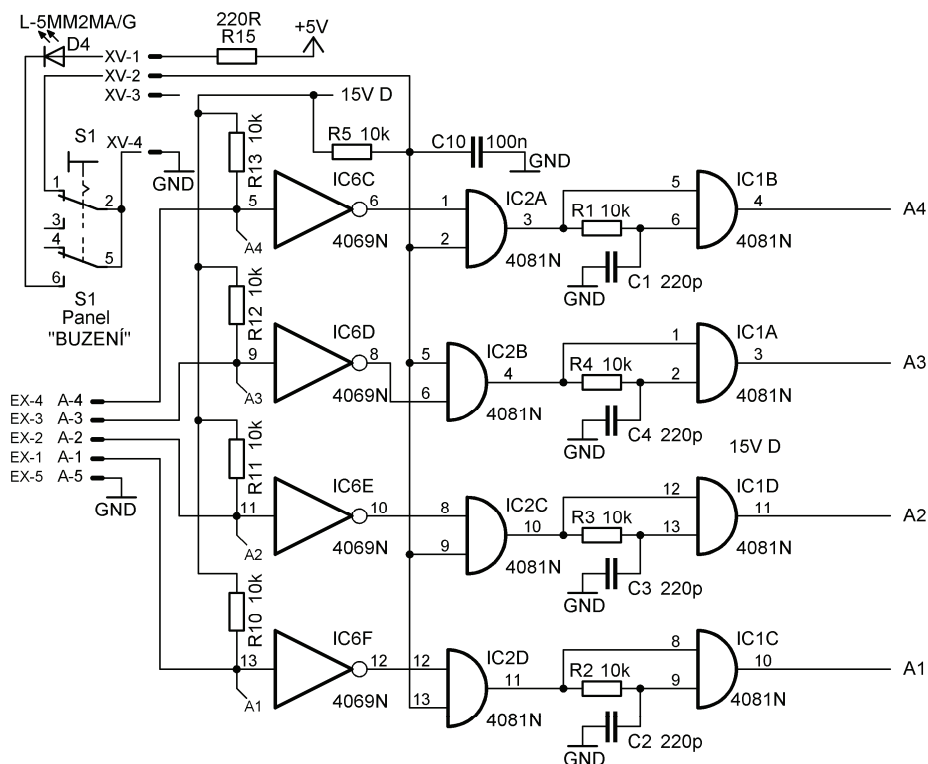
Obr.3.9: Výstupní výkonový obvod pulzního měniče a jeho budiče.

Výstupním obvodem celého dynamometru je výstupní výkonový obvod pulzního měniče viz Obr.3.9, jenž je tvořen můstkem čtyř výkonových tranzistorů MOSFET typu IRF3710. S ohledem na experimentální a demonstrační charakter zařízení byla věnována mimořádná pozornost chlazení těchto

výkonových polovodičových spínačů a proto jsou namontovány na dvou rozměrných hliníkových chladicích profilech, jež jsou spolu s převodníkem na měření výstupního proudu typu LA 55 – P umístěny v chladicím tunelu z galvanicky zinkovaného ocelového plechu. Chladiče jsou trvale ofukovány proudem vzduchu z v tunelu vestavěného počítačového ventilátoru, který je napájen ze stabilizovaného zdroje na desce plošných spojů DNM-PK-ZD napětím UV, jehož velikost lze nastavit až na 12 V pro plný chladicí výkon. Toto uspořádání umožňuje i nucenou výměnu vzduchu ve skříni pulzního měniče.

Výstupní spínače THA, TDA, THB a TDB jsou konektory PSH připojeny do desky plošných spojů DNM-PK-VCM k budícím integrovaným obvodům IC3 a IC4, jež jsou typu IR2110. Tyto integrované budiče vytvářejí, v součinnosti s tranzistory TDA a TDB, potřebná plovoucí napětí (na kondenzátorech C7 a C8) pro spínání tranzistorů THA a THB z jediného společného napájecího napětí elektroniky výkonové části měniče (+15V D). Pro sepnutí tranzistorů výstupního obvodu měniče je třeba na řídicí vstupy (na obrázku A1 až A4) budičů IC3 a IC4 přivést signál s vysokou úrovní napětí - v popisovaném případě odvozeného také z napájecího napětí +15V D.

Převodník pro měření proudu LA 55 – P je napájen napětím  $\pm 15$  V z desky DNM-PK-ZD, jež je symetrické vůči analogové zemi GNDA. Výstupní proud převodníku 3 mA odpovídá výstupnímu proudu 1 A, tekoucímu do zátěže svorkami A a B, a vytváří na měřicím rezistoru RM výstupní napětí 450 mV, jež je vyvedeno konektorem XU typu PSH ke zpracování signálovým mikrokontrolérem vývojového kitu. Navíc, pro potřeby externího sledování, je toto napětí z desky DMN-PK-VCM vyvedeno vodiči U1 a U2 na konektor CANON 9 „EXTERNÍ ŘÍZENÍ“ na čelním panelu skříně pulzního měniče - na jeho vývody EX-6 a EX-9.

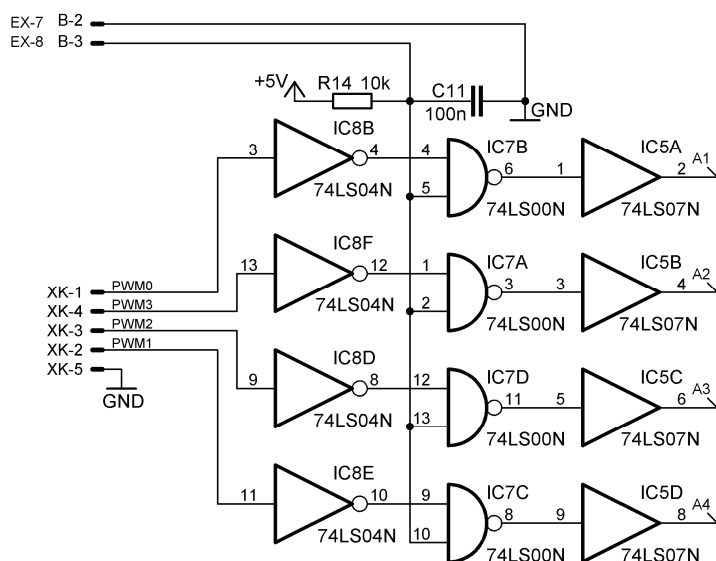


Obr.3.10: Externí vstupy a ochranné zpožďovací obvody.

Externí řízení výstupního obvodu pulzního měniče je možné z konektoru „EXTERNÍ ŘÍZENÍ“ umístěného na čelním panelu skříně pulzního měniče, pokud jsou vývody konektoru EX-1 až EX-4 ovládány obvody s otevřeným kolektorovým výstupem, schopným pracovat při napájecím napětí +15 V. Na vstupech čtveřice invertorů obvodu IC6 (4089N) se totiž realizuje logický součet se signály PWM0 až PWM3 z interního vývojového kitu dynamometru. Nechtěné kolizi těchto signálů brání propojka vývodů EX-7 a EX-8 (viz Obr.3.11) v konektoru kabelu pro externí řízení, která - jak bude popsáno dále – vnitřní signály PWM z vývojového kitu odpojí.

Pro snadné ovládání při experimentálním provozu je panel skříně pulzního měniče vybaven páčkovým přepínačem S1 „BUZENÍ“, jímž je možno kdykoliv odpojit buzení výkonové části výstupu měniče. Sepnutím vývodů 1 a 2 přepínače S1 se okamžitě zablokuje vstupní AND členy obvodu IC2 a dojde k následnému vypnutí všech výstupních tranzistorů výkonové části pulzního měniče. Pokud je buzení zapnuto, svítí zeleně na čelním panelu nad přepínačem S1 „BUZENÍ“ LED dioda D4, která je spínána druhou částí přepínače S1 - jeho kontakty 5 a 6. Signalizační dioda D4 je napájena sníženým napětím +5V ze zdrojové desky DNM-PK-ZD.

Integrované obvody IC2 a IC1 (oba 4081N) vytvářejí čtveřici ochranných zpožďovacích obvodů, které brání současnému sepnutí příslušných dvojic tranzistorů TH a TD, čímž by došlo ke zkratu napájení výstupního obvodu a ke zničení těchto spínačů. Potřebnou ochrannou dobu - jmenovitě 2,2 mikrosekundy - vytváří čtveřice zpožďovacích členů R1 až R4 a C1 až C4, jež jsou vřazeny mezi IC2 a IC1. Povel k vypnutí tranzistoru (nízká úroveň) prochází příslušnou dvojicí logických členů AND v IC2 a IC1 okamžitě, kdežto povel k sepnutí tranzistoru (vysoká úroveň) projde až po nabití kondenzátorů na druhých vstupech IC1 - tedy s uvedeným zpožděním.



Obr.3.11: Interní vstupy PWM.

Interní vstupy signálů PWM0 až PWM3 z vývojového kitu jsou na desce DNM-PK-VCM realizovány čtveřicí invertorů integrovaného obvodu IC8 (74LS04N). Výstupy invertorů jsou připojeny na čtveřici logických členů NAND integrovaného obvodu IC7 (74LS00N) ve funkci vstupního hradla, které při externím řízení dynamometru zamezuje přenosu signálů PWM do



výkonové části. Děje se tak propojením i druhého vývodu kondenzátoru C11 na digitální zem GND a uzemněním hradlovacích vstupů IC7 přes propojku na vývodech EX-7 a EX-8 v konektoru kabelu externího řízení - jak již bylo uvedeno výše.

Interní vstupy desky DNM-PK-VCM mimo hradlování signálů napěťově upravují signály PWM z vývojového kitu, jenž je osazen logikou s napájecím napětím 3,3 V tak, že vstupní invertory obvodu IC8 převádí tyto nízké napěťové úrovně do pětivoltové logiky. Výstupní obvod interních vstupů IC5 svými otevřenými kolektorovými výstupy pak v montážním součtu na vstupech obvodů IC6 s dostatečnou napěťovou rezervou ovládá obvody výkonové části pulzního měniče, jež jsou všechny napájeny napájecím napětím 15 V.

### **Deska analogových vstupů, výstupů a komunikace DNM-PK-AND**

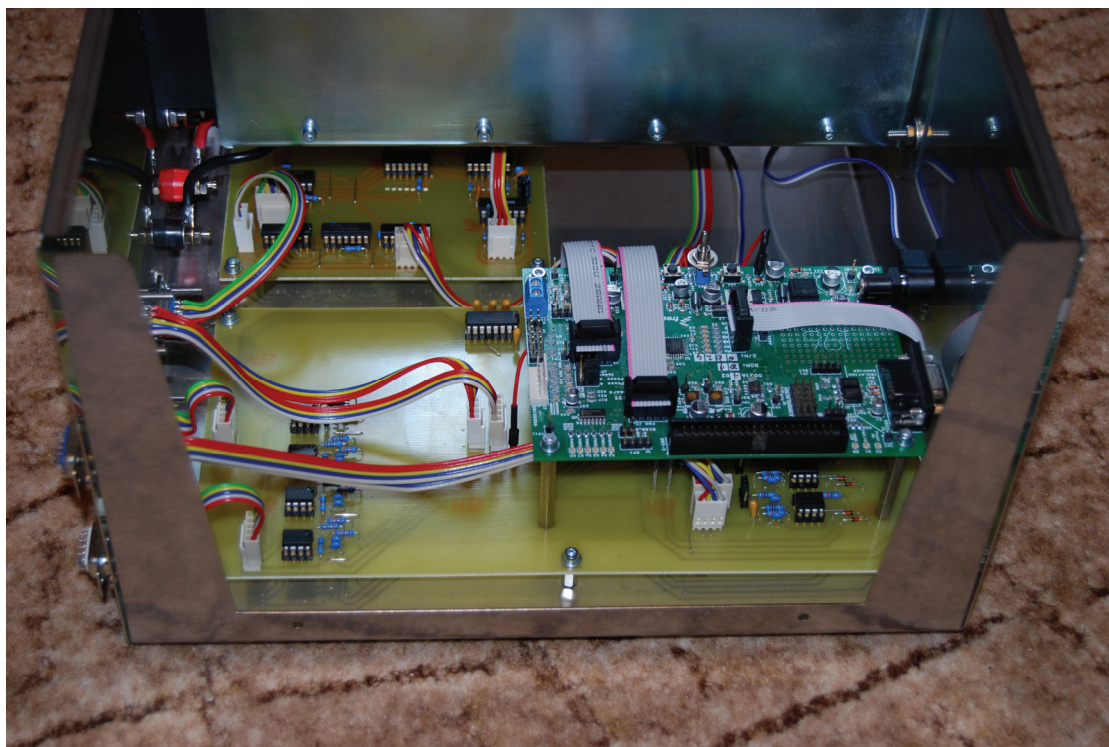
Tato rozšiřující deska v souladu s účelem vyvinutého zařízení obsahuje mimo jiné šest analogových vstupních obvodů pro vstupní napětí obojí polarity s maximální hodnotou 10 V a čtyři obdobné analogové výstupní obvody se stejnými výstupními úrovněmi.

Konstrukci obou druhů těchto obvodů si vyžádala skutečnost, že signálový mikrokontrolér použitého vývojového kitu nepracuje s analogovými signály o napěťovém rozsahu, jenž je obvyklý u laboratorních zařízení a analogové výpočetní techniky. Tento mikrokontrolér totiž disponuje šesti multiplexovanými analogovými vstupy s napěťovými unipolárními úrovněmi maximálně do hodnoty napájecího napětí 3,3 V. Výstupy tohoto mikrokontroléru jsou pouze digitální. Takže již pro požadované názorné zobrazování mikrokontrolérem zpracovávaných průběhů na osciloskopu je nutno použít externí D/A převodník. Na popisované rozšiřující desce instalovaný převodník je proto připojen na tamtéž umístěné čtyři totožné analogové výstupní obvody, jež vůči analogové zemi GNDA symetrizují výstupní napětí čtyř unipolárních výstupů D/A převodníku a upravují je na obvyklý napěťový rozsah  $\pm 10$  V.

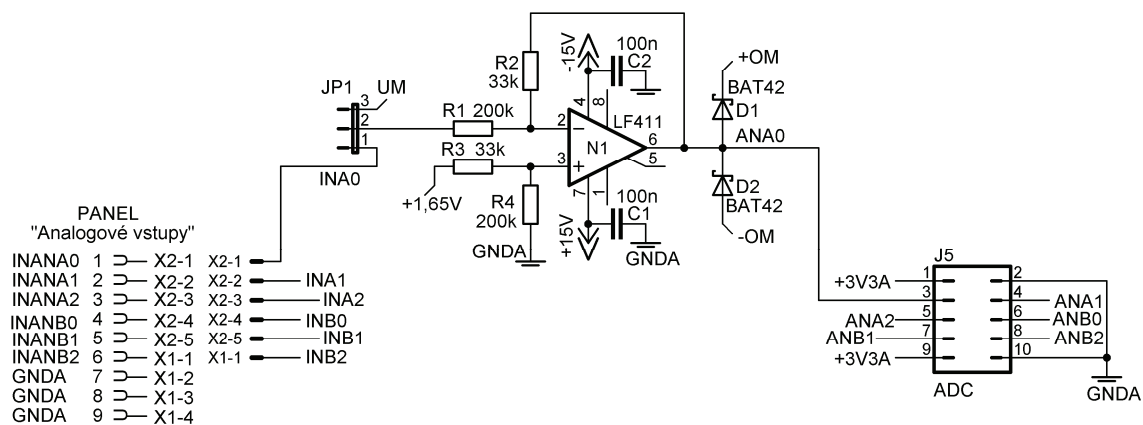
Komunikaci elektroniky skříně pulzního měniče s ovládacím programem dynamometru, běžícím na počítači PC, zajišťuje na desce DNM-PK-AND umístěný integrovaný budič komunikační linky RS232.

Celkové schéma desky DNM-PK-AND se sestává ze dvou listů, pojmenovaných „Analogové vstupy“ a „Analogové výstupy a komunikace“. Oba listy jsou součástí přílohy číslo č. 3.

Celkový pohled na desku DNM-PK-AND osazenou ve skříně pulzního měniče je na *Obr.3.12*.



Obr.3.12: Pohled do skříně pulzního měniče ze strany desky analogových vstupů, výstupů a komunikace.



Obr.3.13: Analogové vstupy desky DNM-PK-AND.

Výše na Obr.3.13 vyobrazený obvod se na rozšiřující desce DNM-PK-AND vyskytuje šestkrát (obvody N1 až N6). Je osazen operačním zesilovačem typu LF411 v pouzdře DIL, jenž se vyznačuje nízkým offsetem i bez korekce a vyhovující šířkou přenášeného pásma. Operační zesilovač je z důvodu součástkové úspornosti a spolehlivosti zapojen jako invertující zesilovač se záporným zesílením -0,165. Rozsah vstupních napětí  $\pm 10$  V je převeden na výstupní rozsah 0 až 3,3 V. Posun

nulové napěťové hladiny vstupu na hodnotu +1,65 V na výstupu zajišťuje dělič R3/R4 v neinvertujícím vstupu operačního zesilovače. Potřebné zesílení A je:

$$A = -\frac{\Delta U_{VYST}}{\Delta U_{VSTUP}} = -\frac{3,3}{20} = -0,165 \quad (3.1)$$

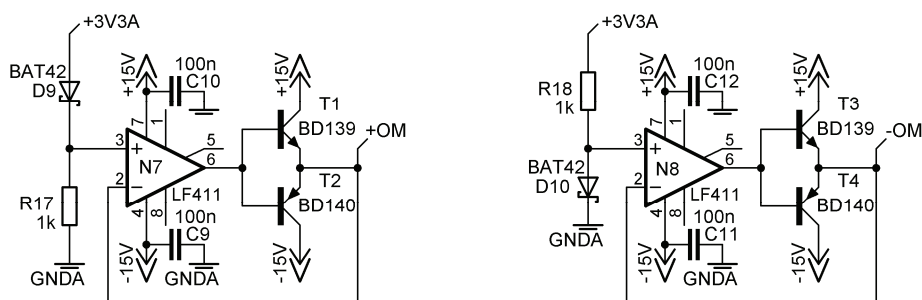
Pro dodržení přijatelného vstupního odporu byly pro potřebný dělič zvoleny rezistory R2/R1 ve stejném poměru hodnot 33kΩ/200kΩ. Stejný poměr rezistorů je použit i na neinvertujícím vstupu operačního zesilovače.

Výstup operačního zesilovače je opatřen dvojicí schottkyho diod BAT42, připojených na zdroje omezovacích napětí +OM a –OM, což zajišťuje ochranu vstupů signálového mikrokontroléru před napětími, překračujícími povolený vstupní rozsah 0 až 3,3 V. Zdroje napětí +OM a –OM Obr.3.14 mají malý vnitřní odpor, ale omezující diody před zničením nadměrným proudem chrání proudová pojistka ve výstupu operačního zesilovače LF411. Ovšem snaha operačního zesilovače kmitat zejména v režimu omezování si vyžádala použití keramických blokovacích kondenzátorů v těsné blízkosti napájecích vývodů pouzdra.

Na vstup každého vstupního zesilovače je možno příslušným jumperem JPn přivést výstupní napětí UM ze snímacího rezistoru RM převodníku, měřícího výstupní proud pulzního měniče.

Výstupní napětí všech šesti vstupních zesilovačů jsou přivedena plochým kabelem na konektor J5 ADC vývojového kitu, jenž je mechanicky upevněn na desce DNM-PK-AND právě nad popsanými vstupními obvody.

Použití invertujícího zesilovače není na závadu, neboť dostatečná rychlost použitého signálového mikrokontroléru umožňuje výslednou hodnotu po A/D převodu invertovat programově se zanedbatelným zpožděním.

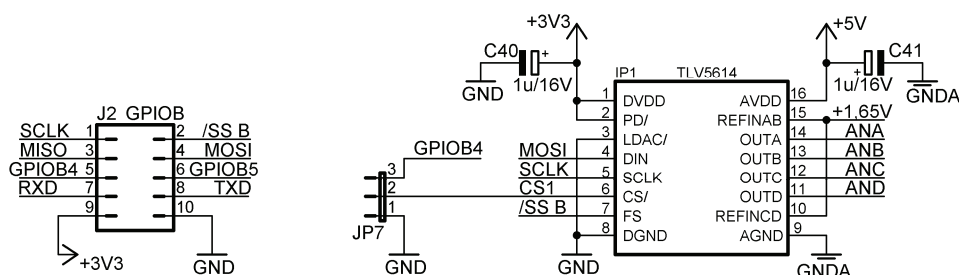


Obr.3.14: Zdroje omezujících napětí + OM a – OM.

Aby výše popsané diodové obvody omezující výstupní napětí ze vstupních zesilovačů na Obr.3.13 mohly uspokojivě pracovat, bylo nutno na desce DNM-PK-AND realizovat dva zdroje omezovacích napětí +OM a –OM s malým výstupním odporem - viz Obr.3.14. Proto na výstup každého ze dvou napěťových sledovačů N7 a N8 byly ve zpětnovazební smyčce zapojeny dva komplementární posilovací tranzistory typu BD139 a BD140.

Hodnoty výstupních napětí jsou upraveny o úbytky na schotkyho diodách BAT42, jež jsou protékány proudem asi 3,3 mA. Tedy obdobným proudem, jaký při saturaci výstupu vstupního zesilovače teče záchytnou omezovací diodou.

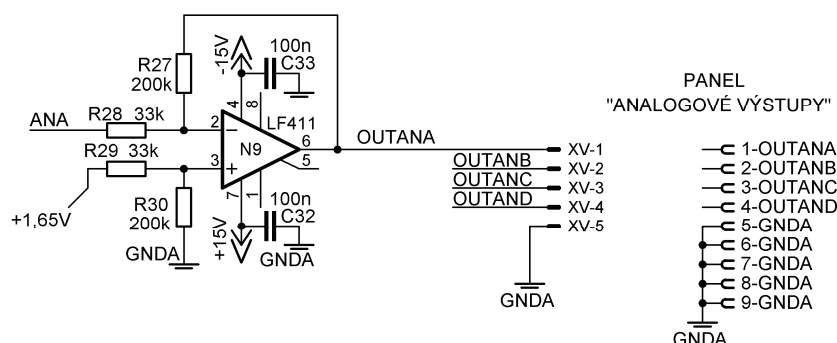
Výstupní napětí zdroje +OM je o úbytek na schotkyho diodě nižší než napájecí napětí signálového mikrokontroléru + 3,3 V, kdežto výstupní napětí zdroje –OM je o úbytek na schotkyho diodě vyšší nad úroveň 0 V tohoto napájecího napětí.



Obr.3.15: D/A převodník analogových výstupních napětí.

Jak již bylo výše uvedeno, signálový mikrokontrolér není vybaven analogovými výstupy. Proto byl mikropočítačový systém doplněn o D/A převodník TLV5614 Obr.3.15. Převodník je 12-bitový se čtyřmi výstupními kanály, komunikuje po SPI rozhraní a má oddělené napájení analogové a digitální části. K mikrokontroléru je převodník připojen pomocí vodičů MOSI, SCLK, /SS B a CS1 konektorem J2 GPIOB z vývojového kitu. Digitální strana převodníku je napájena ze zdroje napětí +3,3 V vývojového kitu. Analogová strana je napájena stabilizovaným napětím +5 V. Jumper JP7 umožňuje buď aktivovat převodník programově z mikrokontroléru, nebo jej vybrat trvale.

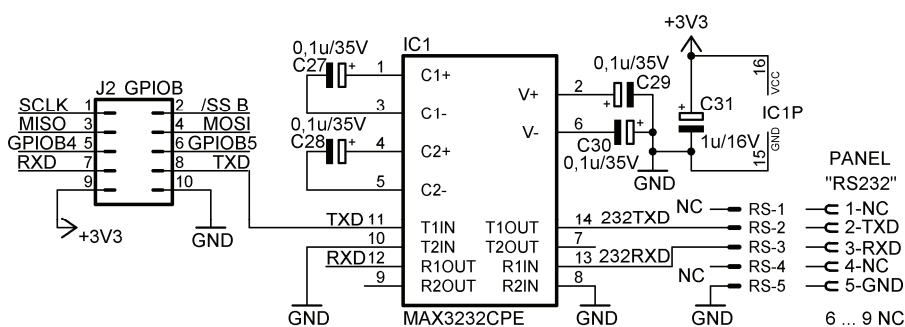
Výstupní napětí převodníku OUTA až OUTD s rozsahem 0 až 3,3 V jsou přivedena na vstupy ANA až AND čtyř výstupních operačních zesilovačů N9 až N12 na Obr.3.16.



Obr.3.16: Výstupní zesilovače analogových výstupů.

Z důvodu stability a maximální obvodové unifikace bylo i pro výstupní zesilovače N9 až N12 použito invertující zapojení. Potřebné zesílení výstupního zesilovače je nastaveno pouhou záměnou hodnot rezistorů vstupního děliče (R28/R27) oproti zesilovačům vstupním. Posun nulové úrovně výstupního napětí pro symetrizaci výstupních napětí zajišťuje zapojení děličů v neinvertujících vstupech. Jejich zapojení je zcela shodné se zapojením ve vstupních zesilovačích N1 až N6. Také toto jednoduché obvodové řešení umožňuje dostatečná rychlost signálového mikrokontroléru, jenž realizuje potřebnou inverzi.

Ochrana rozsahu upravených výstupních napětí  $\pm 10$  V záchytnými diodami u tohoto zapojení není použita a všechna čtyři výstupní napětí jsou přes PSH konektor XV rozšiřující desky DNM-PK-AND vyvedena až na čelní panel skříně do konektoru „ANALOGOVÉ VÝSTUPY“, jenž je typu CANON 9.



Obr.3.17: Budič linky RS 232.

Poněvadž ve vývojovém kitu nainstalovaný budič komunikační linky RS 232 s optickým oddělením je pomalý, byl na rozšiřující desku DNM-PK-AND osazen integrovaný obvod IC1, což je obvyklý budič typu MAX3232CPE pro napájecí napětí 3,3 V. To je přiváděno ze zdroje na desce vývojového kitu. Vstupní signály RX a TX jsou na rozšiřující desku přivedeny z konektoru vývojového kitu J2 GPIOB a tytéž obvodem IC1 již zpracované výstupní signály RX a TX jsou přes konektor RS (typu PSH) vyvedeny na čelní panel skříně pulzního měniče do konektoru „RS 232“, jenž je opět typu CANON 9.

### 3.5 Matematický model a parametry stejnosměrného motoru

[3] Rovnice stejnosměrného motoru s cizím buzením (s permanentními magnety) se zahrnutím elektromagnetických dějů a s uvažováním zjednodušujících předpokladů:

- konstantní parametry (indukčnosti, odpory,  $c\phi$ )
- zanedbáním reakce kotvy

Rovnice vyjádřené v časové oblasti:

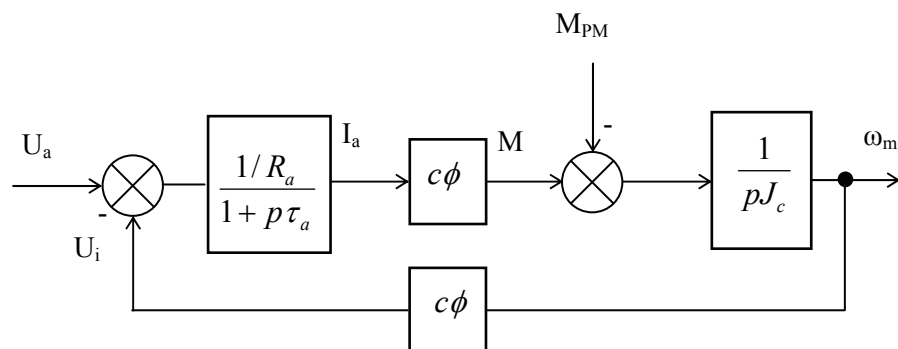
$$u_a = u_i + R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} \quad (3.2)$$

$$\tau_a = \frac{L_a}{R_a} \quad (3.3)$$

$$u_i = c\phi\omega_m \quad (3.4)$$

$$M = c\phi i_a \quad (3.5)$$

$$M - M_{PM} = J_C \frac{d\omega_m}{dt} \quad (3.6)$$



Obr.3.18: Blokové schéma stejnosměrného motoru s konstantním buzením.

V dynamometrickém soustrojí jsou použity dva stejnosměrné motory s permanentními magnety MP 80S/2 od firmy AMER. Údaje ze štítku motoru:

Jmenovitý výkon:	$P_n = 400 \text{ W}$
Jmenovitý proud motoru:	$I_n = 20 \text{ A}$
Jmenovité napájecí napětí:	$U_n = 24 \text{ V}$
Jmenovité otáčky:	$n_n = 2800 \text{ ot/min}$

Následující parametry jsou převzaty z [4]:

Odpor kotevního obvodu:	$R_a = 0,115 \Omega$
Indukčnost kotevního obvodu:	$L_a = 0,306 \text{ mH}$
Elektromagnetická časová konstanta:	$\tau_a = 2,66 \text{ ms}$
Budící konstanta ss motoru:	$c\Phi = 0,074 \text{ Vs}$
Moment setrvačnosti motoru:	$J_m = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ kg.m}^2$
Elektromechanická časová konstanta:	$\tau_m = 26,3 \text{ ms}$

### 3.6 Napět'ové a proudové dimenzování polovodičů

Tranzistor ve vypnutém stavu i nulová dioda v závěrném směru jsou namáhány napětím, které se rovná stejnosměrnému mezilehlému napětí  $U_d$ . Lze tedy říci, že pracovní napětíobou součástek má v ideálním případě velikost  $U_d$ . Na obou prvcích však vzniká navíc přídavný přepět'ový impulz v průběhu jejich vypínání (tj. při zániku proudu tekoucího tranzistorem, popř. nulovou diodou). Toto přepětí je rovno induktivním úbytkům generovaným na parazitní indukčnosti silového obvodu. Konkrétně se jedná o indukčnost smyčky tvořené třemi prvky: mezilehlý napět'ový zdroj - tranzistor - nulová dioda. S ohledem na existenci těchto dynamických přepětí, je nezbytné dimenzovat oba prvky na závěrné napětí přibližně  $2U_d$ . Při napájení z akumulátorů je možno uvažovat rezervu mírně nižší. Tyto závěry jsou podobné pro jakýkoliv typ měniče, pokud je sestaven z horních a dolních spínačů chápaných jako trojpóly podle Obr.2.2.[1]

$$I_{C_{\max}} = I_Z \quad I_{C_{stř}} = I_Z \cdot z \quad I_{C_{ef}} = I_Z \cdot \sqrt{z} \quad (3.7 \text{ a, b, c})$$

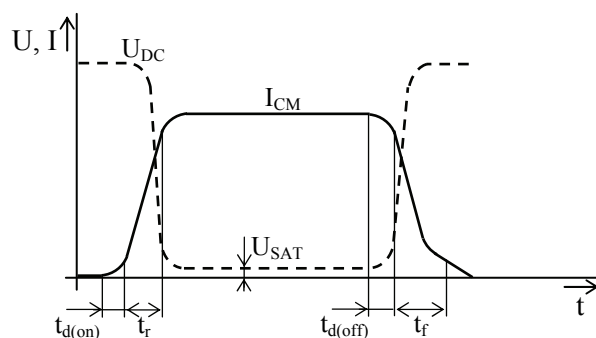
$$I_{D0_{\max}} = I_Z \quad I_{D0_{stř}} = I_Z \cdot (1 - z) \quad I_{D0_{ef}} = I_Z \cdot \sqrt{1 - z} \quad (3.8 \text{ a, b, c})$$

Pro výkonovou část pulzního měniče byly zvoleny tranzistory MOSFET IRF3710, jejichž základní parametry jsou:

$V_{DSS} = 100 \text{ V}$	$t_{d(on)} = 12 \text{ ns}$
$I_D = 57 \text{ A}$	$t_r = 58 \text{ ns}$
$R_{DS(on)} = 0,023 \Omega$	$t_{d(off)} = 45 \text{ ns}$
$R_{\theta JC} = 0,75 \text{ }^\circ\text{C/W}$	$t_f = 47 \text{ ns}$

### 3.7 Výpočet ztrátového výkonu a návrh chladicí soustavy

Při výpočtu ztrátového výkonu a návrhu chladicí soustavy jsem postupoval dle [5].



Obr.3.19: Časový průběh při spínání RL zátěže.

### Ztrátový výkon na MOSFET tranzistoru

Základní údaje:

$$U_{DC} = 24 \text{ V}, I_{CM} = 20 \text{ A}, f_s = 5 \text{ kHz}, t_r = 58 \text{ ns}, t_f = 47 \text{ ns}, R_{DS(on)} = 0,023 \Omega$$

Výpočet ztrátového výkonu při střídě  $z = 0,75$ :

- ztráty při zapínání tranzistoru

$$P_{on} = \frac{U_{DC} \cdot I_{CM} \cdot t_r \cdot f_s}{2} = \frac{24 \cdot 20 \cdot 58 \cdot 10^{-9} \cdot 5 \cdot 10^3}{2} = 0,0696 \text{ W} \quad (3.9)$$

- ztráty při vypínání tranzistoru

$$P_{off} = \frac{U_{DC} \cdot I_{CM} \cdot t_f \cdot f_s}{2} = \frac{24 \cdot 20 \cdot 47 \cdot 10^{-9} \cdot 5 \cdot 10^3}{2} = 0,0564 \text{ W} \quad (3.10)$$

- ztráty v sepnutém stavu (vodivý stav)

$$t_{cond} = zT_s - t_r - t_f = 0,75 \cdot \frac{1}{5000} - 58 \cdot 10^{-9} - 47 \cdot 10^{-9} = 150 \mu\text{s} \quad (3.11)$$

$$P_{cond} = R_{DS(on)} \cdot I_{CM}^2 \cdot t_{cond} \cdot f_s = 0,023 \cdot 20^2 \cdot 150 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^3 = 6,9 \text{ W} \quad (3.12)$$

Ztráty ve vypnutém tranzistoru (nevodivém stavu) jsou zanedbány.

Střední ztrátový výkon na jednom tranzistoru:

$$P_{t(AV)} = P_{on} + P_{off} + P_{cond} = 0,0696 + 0,0564 + 6,9 = 7,0261 \text{ W} \quad (3.13)$$

### Ztrátový výkon na zpětné diodě

$$U_{T0} = 1,3 \text{ V}, r_d = 0,015 \Omega$$

Hodnoty proudu jsou vypočteny podle vztahu (3.7) pro  $z = 0,75$



$$I_{D0stř} = I_z(1 - z) = 20(1 - 0,5) = 5 A$$

$$I_{D0ef} = I_z \sqrt{1 - z} = 20 \sqrt{1 - 0,5} = 10 A$$

Sřední hodnoty ztrátového výkonu na zpětné diodě:

$$P_{d(AV)} = U_{T0} I_{D0stř} + r_d I_{D0ef}^2 = 1,3 \cdot 5 + 0,015 \cdot 10^2 = 8 W \quad (3.14)$$

### Celkový ztrátový výkon:

$$P_{tot} = 2 \cdot P_{t(AV)} + 2 \cdot P_{d(AV)} = 2 \cdot 7,026 + 2 \cdot 8 = 30,1 W \quad (3.15)$$

### Výpočet tepelného odporu chladiče

Tepelný odpor polovodičový přechod - pouzdro (IRF3710)

$$R_{vjct} = 0,75 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Tepelný odpor pouzdro - chladič (izolační podložka)

$$R_{vcr} = 0,4 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Teplota okolí

$$v_a = 40^\circ\text{C}$$

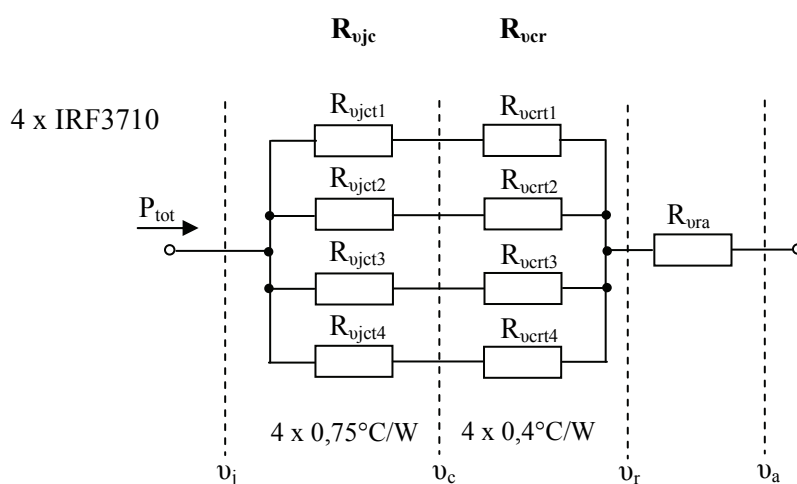
Maximální teplota polovodičového přechodu

$$v_j = 150^\circ\text{C}$$

Rovnice pro výpočet tepelného odporu chladiče  $R_{vra}$ :

$$v_j - v_a = (R_{vjct} + R_{vcr} + R_{vra}) \cdot P_{tot} \quad (3.16)$$

Při návrhu chladiče bylo předpokládáno, že budou všechny součástky umístěny na společném chladiči. Tepelné pole pro dimenzování chladiče je znázorněno na Obr.3.20.



Obr.3.20: Tepelné pole dimenzovaného chladiče.

- celkový tepelný odpor přechod - pouzdro  $R_{ujc}$

$$R_{ujc} = \frac{R_{ujct}}{4} = \frac{0,75}{4} = 0,188^{\circ}C / W \quad (3.17)$$

- celkový tepelný odpor pouzdro - chladič  $R_{ucr}$

$$R_{ujc} = \frac{R_{ucrt}}{4} = \frac{0,4}{4} = 0,1^{\circ}C / W \quad (3.18)$$

Vyjádřením  $R_{vra}$  z rovnice (3.15) a dosazením výše uvedených hodnot tepelných odporů obdržíme výsledný tepelný odpor potřebný pro volbu chladiče.

$$R_{vra} = \frac{v_j - v_a}{P_{tot}} - R_{ujc} - R_{ucr} = \frac{150 - 40}{30,1} - 0,188 - 0,1 = 3,37^{\circ}C / W \quad (3.19)$$

Výrobce udává pro délku chladiče 150 mm tepelný odpor  $2,4^{\circ}C/W$ . Ve vyrobeném zařízení jsou použity dva chladiče, každý o délce 230 mm, z identického profilu, což při přirozeném proudění vzduchu vyhovuje s dostatečnou rezervou. Tato rezerva, s ohledem na charakter a účel použití zařízení, je ještě zvětšena použitím nuceného proudění vzduchu, zajištěného za provozu stále běžícím ventilátorem.

### 3.8 Programové vybavení

Vývoj programového vybavení pro mikrokontroler MC56F8023 byl proveden ve vývojovém prostředí Metrowerks CodeWarrior. Pro zápis byla zvolena kombinace jazyka symbolických adres a jazyka C. Součástí vývojového prostředí jsou také rozsáhlé knihovny funkcí pro uvedený mikrokontrolér, které umožňují snadné ovládání a přístup k registru jak periferních obvodů, tak i k registrům jádra mikrokontroléru. Uvedené funkce jsou psané v jazyce symbolických adres a jednoduše se začleňují do programu psaného v jazyce C. Pro snadné nastavení registrů periferních obvodů a všech inicializačních hodnot mikrokontroléru byl použit programový nástroj QuickStart, který spolupracuje s vývojovým prostředím.

Při vytváření programu pro signálový mikrokontroler MC56F8023 který řídí celý dynamometr jsem vycházel z [6]. V této práci jsem se seznámil se základními vlastnostmi a použitím popisovaného mikrokontroléru při řízení stejnosměrného motoru s permanentními magnety. Autor zde vytvořil knihovny funkcí, které se po prostudování daly bez úprav použít. Stačilo pouze přepsat hlavní část programu main.c za použití [7] a [8].

Autor [6] ve své práci řešil řízení čtyřkvadrantového pulzního měniče pohánějícího stejný stejnosměrný motor, jako v mém případě. V programu jsou použity dva serioparalelní PI regulátory, které spolu dohromady tvoří strukturu regulace rychlosti s podřazenou smyčkou proudu.

Dynamometr potřebuje pro svou činnost, aby byl pomocí rozhraní RS 232 připojen PC, na kterém běží terminálový program. Pomocí tohoto PC se dynamometr ovládá a také se nastavují jeho parametry.

Funkci programu nejlépe vysvětlím popisem jeho činností od samotného spuštění. Po zapnutí hlavního vypínače na skřini pulzního měniče a následném ustálení napájecích napětí pro vyvojový kit, dojde k automatickému spuštění programu. Po inicializaci mikrokontroléru, která v prvním kroku spustí watchdog, pak systémové hodiny, nastaví porty, PWM modul, rozhraní SPI a SCI, nastaví čítač, jenž je připojen k inkrementálnímu čidlu, inicializuje AD převodník, inicializuje přerušení. Pak se nastaví offset AD převodníku. Po něm jsou vynulovány všechny čtyři výstupní kanály na DA převodníku. Následně je implicitně nastaveno unipolární řízení a tyto hodnoty:

regulátor I:  $K_r = 10,9$   
 $T_r = 30 \text{ ms}$   
 $T_o = 0,1 \text{ ms}$   
 $\omega_m = 1\,900$

regulátor n:  $K_r = 23,4$   
 $T_r = 9 \text{ ms}$   
 $T_o = 2 \text{ ms}$   
 $\omega_m = 10 \text{ A}$

Následně jsou vypočteny hodnoty pro PI regulátor proudu a otáček. Jako poslední krok před skokem do hlavní smyčky, jsou povolena přerušení.

Prvním krokem v hlavní smyčce je vyslání MENU na terminál. Pomocí MENU lze zadat otáčky, zadat povel start nebo stop, reverzovat smysl otáčení elektromotoru dynamometru, požádat o výpis parametrů a jako poslední nabídka je změny parametrů. Kromě změny parametrů pro regulátor proudu a otáček, lze také provést změnu způsobu řízení a to z unipolárního na bipolární nebo naopak. Po vyslání MENU se v hlavní smyčce již jen čeká na příjem čísla příkazu, který se má vykonat a nuluje se watchdog.

Veškerá další činnost programu se uskutečňuje v režimu přerušení, ke kterému dochází jednou za  $100\mu\text{s}$ . Tento čas je odvozen od púlperody vratného čítače, běžícího v modulu PWM a to v každém vrcholu pomyslného trojúhelníkového signálu, který se používá pro komparaci s hodnotami registru pro vytváření PWM modulace.

Prvním krokem v režimu přerušení je vyčtení hodnoty z AD převodníku, ke kterému je připojen měřicí převodník proudu pro měření kotevního proudu elektromotoru dynamometru. Následně je proveden výpočet akční hodnoty v PI regulátoru proudu. Poté se vyšle skutečná hodnota proudu na A kanál DA převodníku. Následuje zápis nové hodnoty do registru PWM modulu a odstartuje se nový převod na AD převodníku. Pokud program realizuje dvacáté přerušení (co 2 ms), vyhodnotí se stav čítače inkrementálního čidla a uskuteční se výpočet akční hodnoty v PI regulátoru otáček. Posledním krokem je vyslání skutečné hodnoty otáček na B kanál DA převodníku. Tím je přerušení ukončeno a program pokračuje v hlavní smyčce, kde čeká na příjem znaku z RS 232.

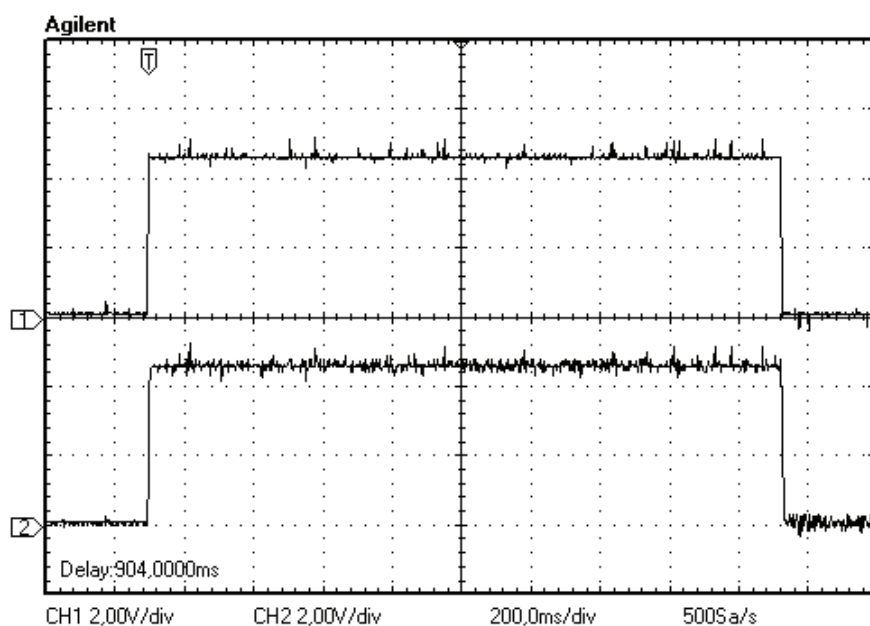
## 4. Měření na dynamometru

### 4.1 Popis měření a naměřené průběhy

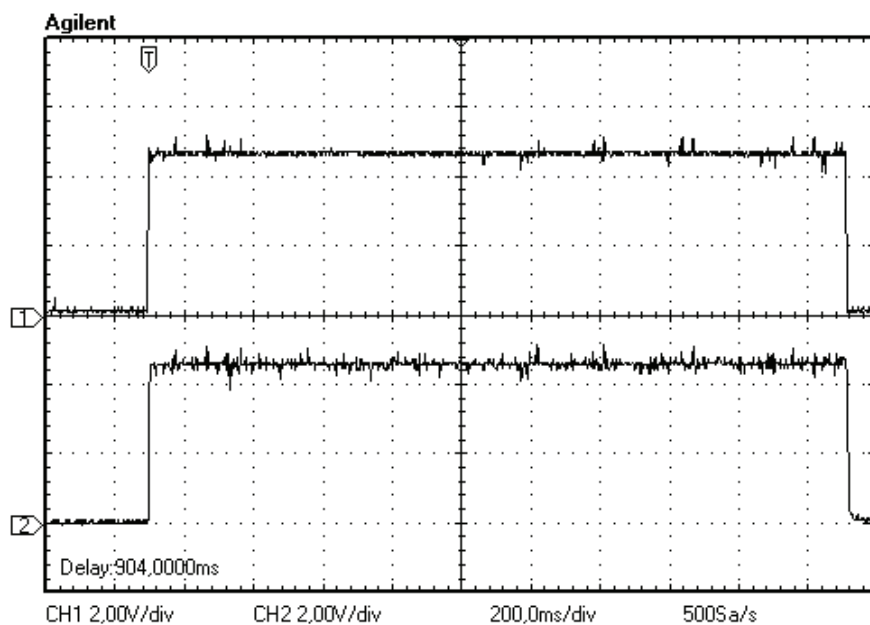
Na realizovaném dynamometru řízeném mikropočítačovým systémem bylo provedeno měření dle pokynů vedoucího diplomové práce. Blokové schéma zapojení je na Obr.3.2.

Uspořádání měřicího stanoviště je následující. Na vstupní svorky pulzního měniče byl připojen zdroj stejnosměrného napětí sestávající se dvou kusů automobilových olověných akumulátorů 12 V/71 Ah. K výstupním svorkám pulzního měniče byl připojen motor dynamometru s vloženou indukčností o velikosti 160 mH k vyhlazení velkého zvlnění kotevního proudu.

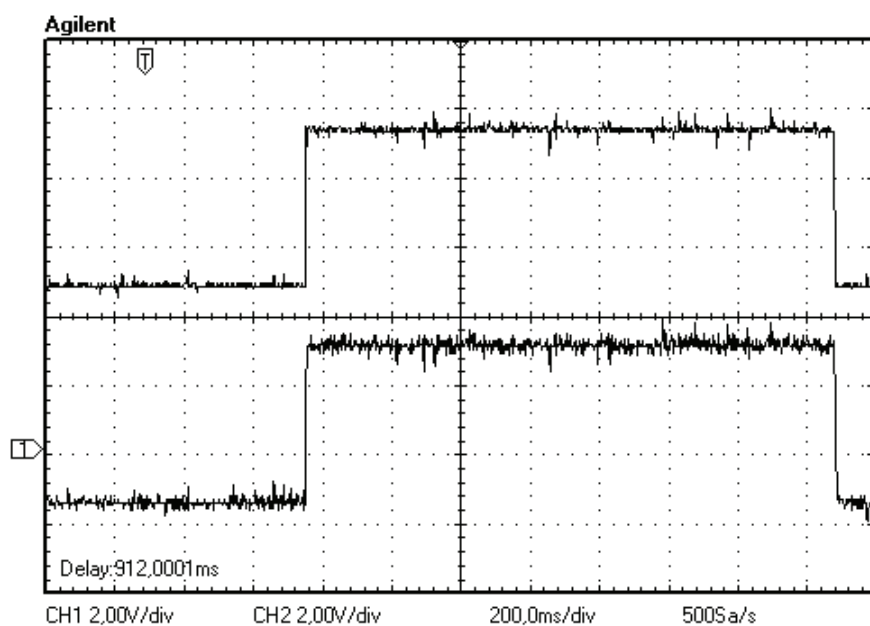
Výstup z inkrementálního čidla byl připojen ke skřini pulzního měniče do konektoru „IRC“. Dále byl pomocí RS 232 připojen PC na kterém běžel terminálový program. Pro zobrazení důležitých veličin byl ke konektoru „ANALOG. VÝSTUPY“ připojen digitální paměťový osciloskop. Ke svorkám měřeného motoru byl připojen buď zatěžovací odpor, nebo napájecí zdroj DIAMETRAL 0 - 30 V, 0 - 40 A. Všechna měření byla provedena s nastavením hodnot regulátoru dle kapitoly 3.8 se spínací frekvencí 5 kHz.



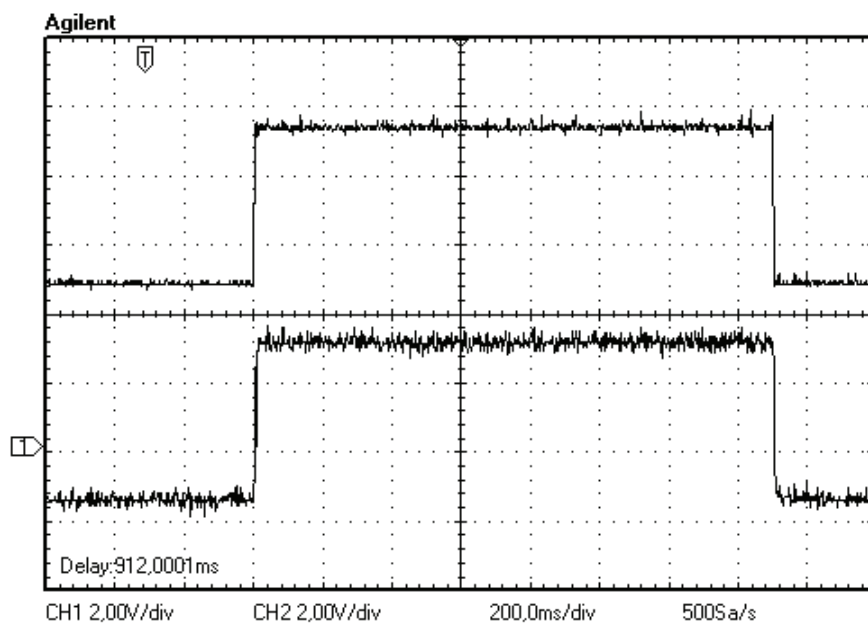
Obr.4.1: Průběh žádaného a skutečného proudu tekoucího dynamometrem při jim vyvolané skokové změně brzdného momentu. Skok proudu  $0A \rightarrow 5A \Rightarrow 0Nm \rightarrow 0,37Nm$ . Na měřený motor připojeno konstantní napětí  $U = 10V$ . Bipolární řízení. (kanál 1:  $i_z=f(t)$ ,  $i_z= 2A/d$ , kanál 2:  $i_{skut}=f(t)$ ,  $i_{skut}= 2A/d$ )



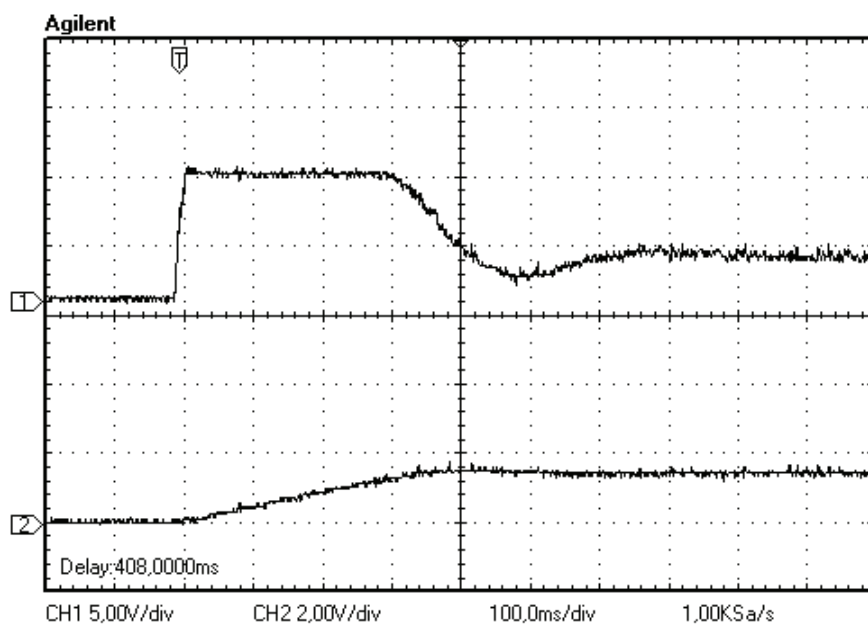
Obr.4.2: Průběh žádaného a skutečného proudu tekoucího dynamometrem při jím vyvolané skokové změně brzdného momentu. Skok proudu  $0A \rightarrow 5A \Rightarrow 0Nm \rightarrow 0,37Nm$ . Na měřený motor připojeno konstantní napětí  $U = 15V$ . Bipolární řízení.  
(kanál 1:  $i_z=f(t)$ ,  $i_z= 2A/d$ , kanál 2:  $i_{skut}=f(t)$ ,  $i_{skut}= 2A/d$ )



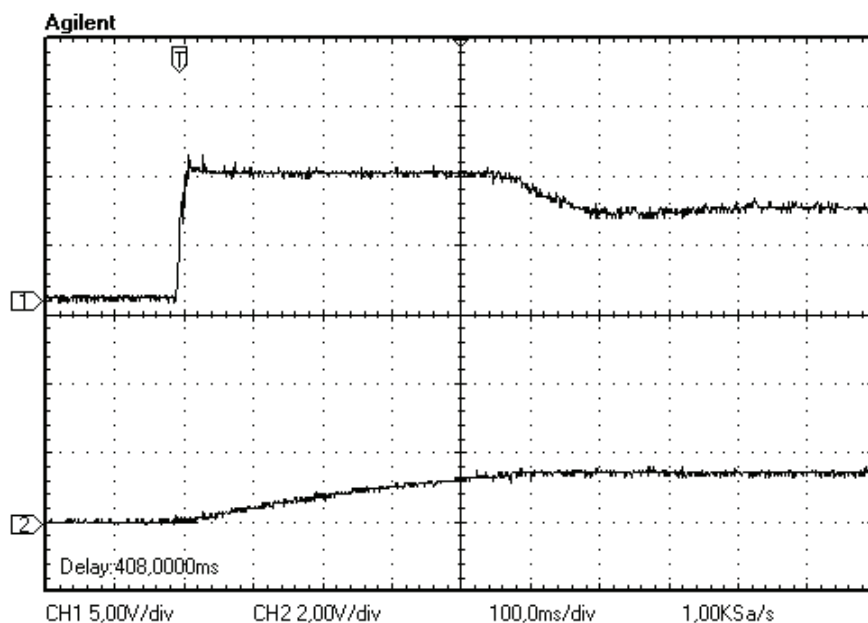
Obr.4.3: Průběh žádaného a skutečného proudu tekoucího dynamometrem při jím vyvolané skokové změně brzdného momentu. Skok proudu  $5A \rightarrow 10A \Rightarrow 0,37Nm \rightarrow 0,74Nm$ . Na měřený motor připojeno konstantní napětí  $U = 10V$ . Bipolární řízení.  
(kanál 1:  $i_z=f(t)$ ,  $i_z= 2A/d$ , kanál 2:  $i_{skut}=f(t)$ ,  $i_{skut}= 2A/d$ )



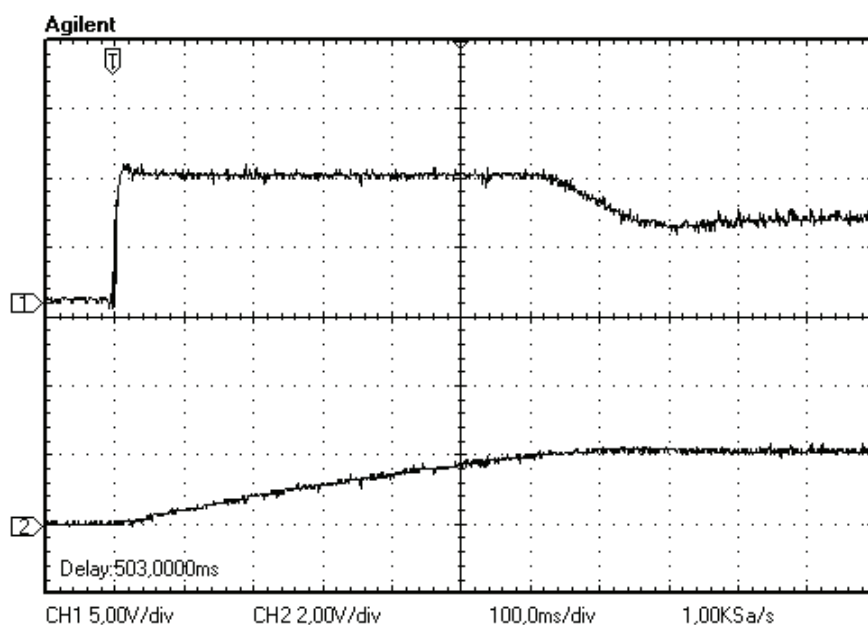
Obr.4.4: *Průběh žádaného a skutečného proudu tekoucího dynamometrem při jím vyvolané skokové změně brzdného momentu. Skok proudu  $5A \rightarrow 10A \Rightarrow 0,37Nm \rightarrow 0,74Nm$ . Na měřený motor připojeno konstantní napětí  $U = 15V$ . Bipolární řízení.  
(kanál 1:  $i_z=f(t)$ ,  $i_z=2A/d$ , kanál 2:  $i_{skut}=f(t)$ ,  $i_{skut}=2A/d$ )*



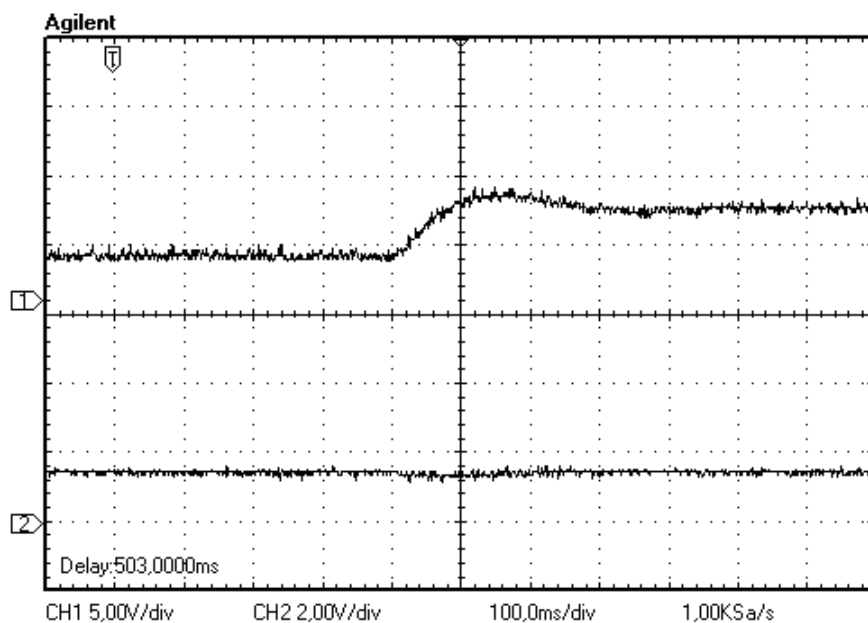
Obr.4.5: *Průběh skutečného proudu tekoucího dynamometrem a skutečných otáček při jeho rozběhu na 1000 ot/min. Proudové omezení 10A, bipolární řízení. Měřený motor naprázdno.  
(kanál 1:  $i_{skut}=f(t)$ ,  $i_{skut}=5A/d$ , kanál 2:  $n_{skut}=f(t)$ ,  $n_{skut}=1500ot/d$ )*



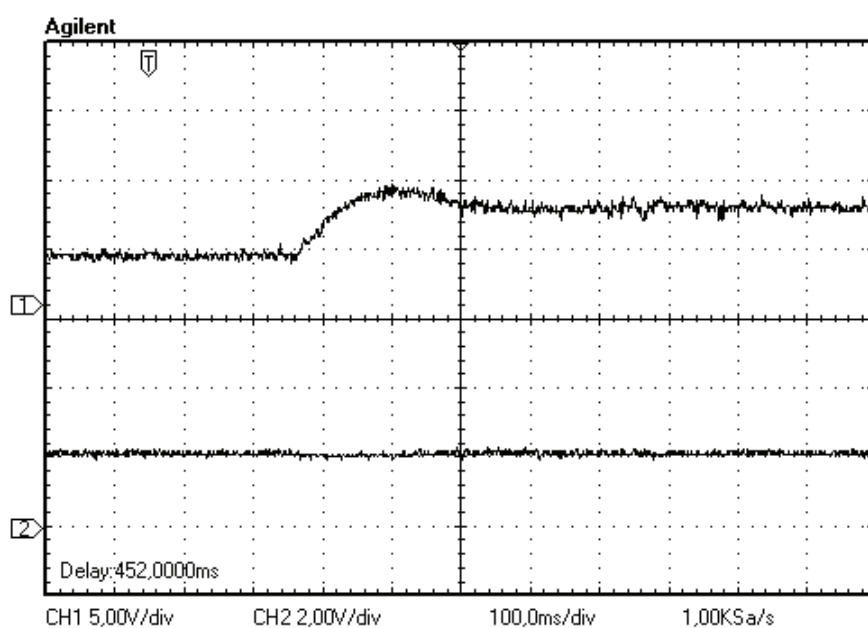
Obr.4.6: *Průběh skutečného proudu tekoucího dynamometrem a skutečných otáček při jeho rozběhu na 1000 ot/min. Proudové omezení 10A, bipolární řízení. Měřený motor zatížen odporem mezi přívodními svorkami.  
(kanál 1:  $i_{skut}=f(t)$ ,  $i_{skut}=5A/d$ , kanál 2:  $n_{skut}=f(t)$ ,  $n_{skut}=1500ot/d$ )*



Obr.4.7: *Průběh skutečného proudu tekoucího dynamometrem a skutečných otáček při jeho rozběhu na 1500 ot/min. Proudové omezení 10A, bipolární řízení. Měřený motor zatížen odporem mezi přívodními svorkami.  
(kanál 1:  $i_{skut}=f(t)$ ,  $i_{skut}=5A/d$ , kanál 2:  $n_{skut}=f(t)$ ,  $n_{skut}=1500ot/d$ )*

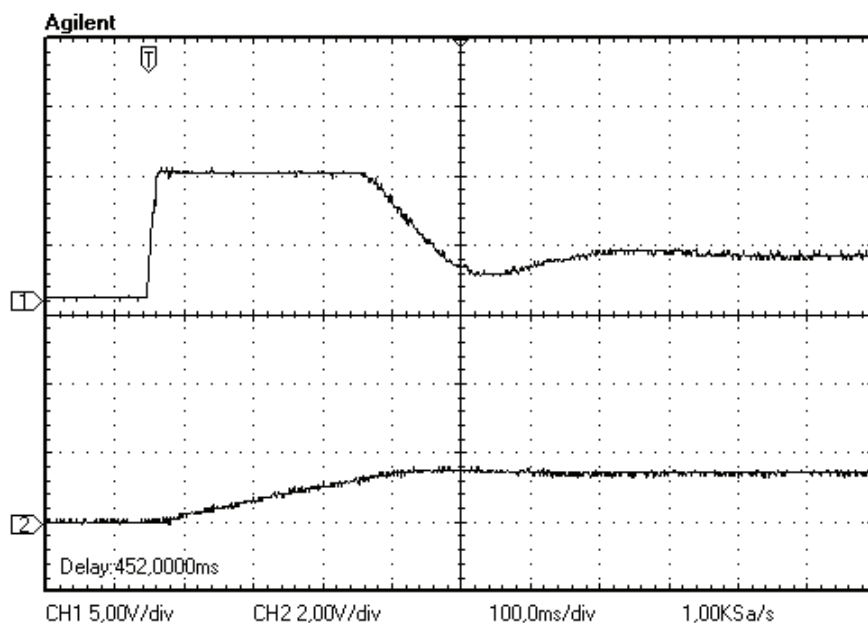


Obr.4.8: *Průběh skutečného proudu tekoucího dynamometrem a skutečných otáček dynamometru roztočeného na 1000 ot/min při skokové změně zátěže (mezi svorky měřeného motoru byl vložen odpor). Proudové omezení 10A, bipolární řízení.  
(kanál 1:  $i_{skut}=f(t)$ ,  $i_{skut}=5A/d$ , kanál 2:  $n_{skut}=f(t)$ ,  $n_{skut}=1500ot/d$ )*



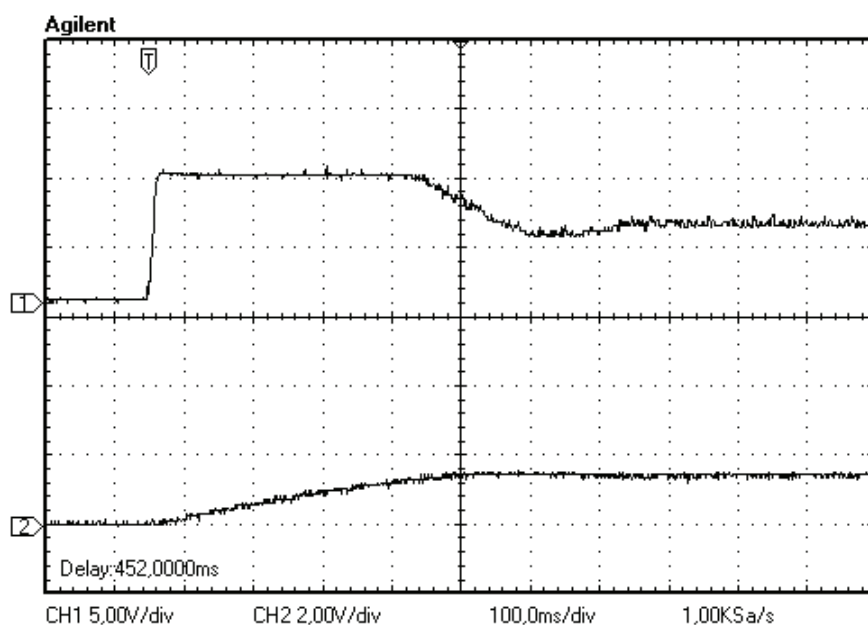
Obr.4.9: *Průběh skutečného proudu tekoucího dynamometrem a skutečných otáček dynamometru roztočeného na 1500 ot/min při skokové změně zátěže (mezi svorky měřeného motoru byl vložen odpor). Proudové omezení 10A, bipolární řízení.  
(kanál 1:  $i_{skut}=f(t)$ ,  $i_{skut}=5A/d$ , kanál 2:  $n_{skut}=f(t)$ ,  $n_{skut}=1500ot/d$ )*





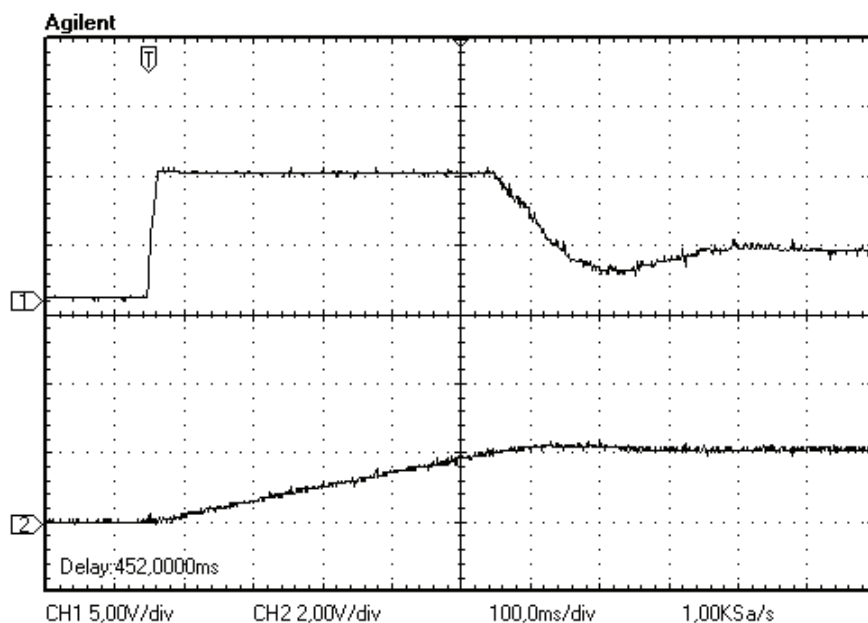
Obr.4.10: *Průběh skutečného proudu tekoucího dynamometrem a skutečných otáček při jeho rozběhu na 1000 ot/min. Proudové omezení 10A, unipolární řízení. Měřený motor naprázdno.*

(kanál 1:  $i_{skut}=f(t)$ ,  $i_{skut}= 5A/d$ , kanál 2:  $n_{skut}=f(t)$ ,  $n_{skut}= 1500ot/d$ )



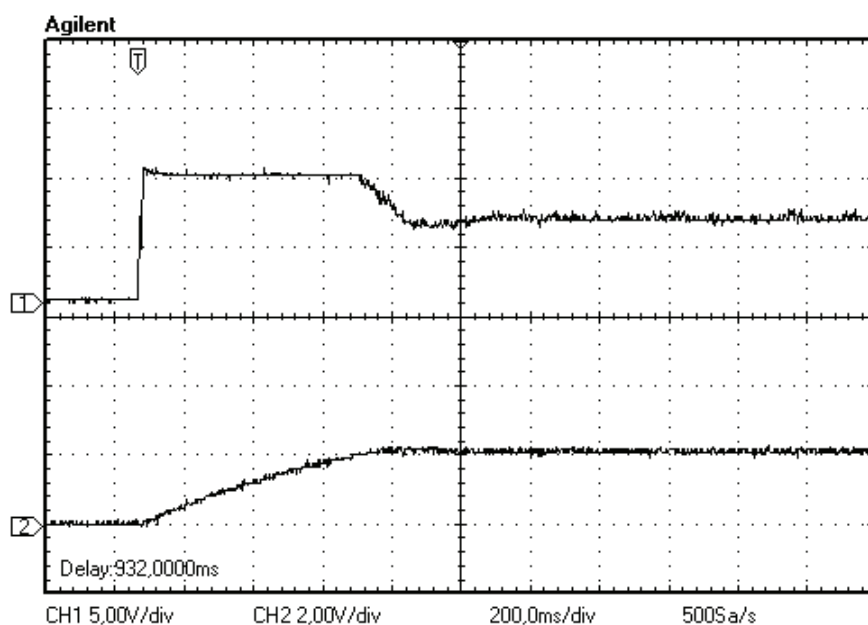
Obr.4.11: *Průběh skutečného proudu tekoucího dynamometrem a skutečných otáček při jeho rozběhu na 1000 ot/min. Proudové omezení 10A, unipolární řízení. Měřený motor zatížen odporem mezi přívodními svorkami.*

(kanál 1:  $i_{skut}=f(t)$ ,  $i_{skut}= 5A/d$ , kanál 2:  $n_{skut}=f(t)$ ,  $n_{skut}= 1500ot/d$ )



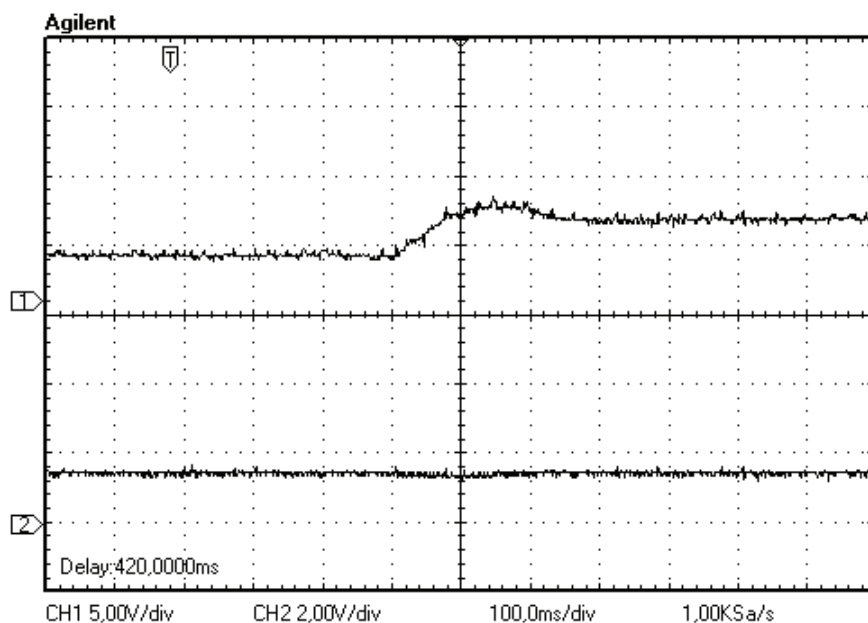
Obr.4.12: *Průběh skutečného proudu tekoucího dynamometrem a skutečných otáček při jeho rozběhu na 1500 ot/min. Proudové omezení 10A, unipolární řízení. Měřený motor naprázdno.*

(kanál 1:  $i_{skut}=f(t)$ ,  $i_{skut}= 5A/d$ , kanál 2:  $n_{skut}=f(t)$ ,  $n_{skut}= 1500ot/d$ )

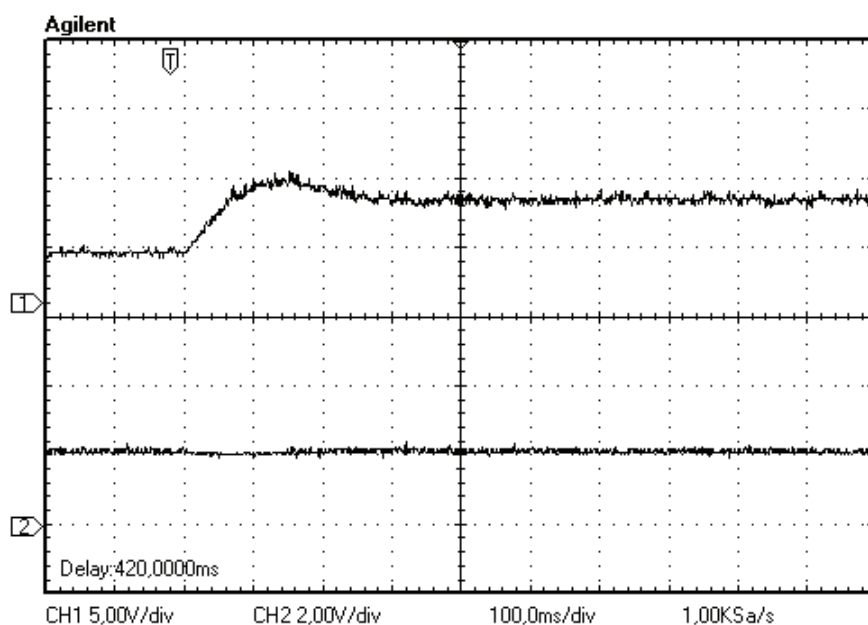


Obr.4.13: *Průběh skutečného proudu tekoucího dynamometrem a skutečných otáček při jeho rozběhu na 1500 ot/min. Proudové omezení 10A, unipolární řízení. Měřený motor zatížen odporem mezi přívodními svorkami.*

(kanál 1:  $i_{skut}=f(t)$ ,  $i_{skut}= 5A/d$ , kanál 2:  $n_{skut}=f(t)$ ,  $n_{skut}= 1500ot/d$ )



Obr.4.14: *Průběh skutečného proudu tekoucího dynamometrem a skutečných otáček dynamometru roztočeného na 1000 ot/min při skokové změně zátěže (mezi svorky měřeného motoru byl vložen odpor). Proudové omezení 10A, unipolární řízení.  
(kanál 1:  $i_{skut}=f(t)$ ,  $i_{skut}=5A/d$ , kanál 2:  $n_{skut}=f(t)$ ,  $n_{skut}=1500ot/d$ )*



Obr.4.15: *Průběh skutečného proudu tekoucího dynamometrem a skutečných otáček dynamometru roztočeného na 1500 ot/min při skokové změně zátěže (mezi svorky měřeného motoru byl vložen odpor). Proudové omezení 10A, unipolární řízení.  
(kanál 1:  $i_{skut}=f(t)$ ,  $i_{skut}=5A/d$ , kanál 2:  $n_{skut}=f(t)$ ,  $n_{skut}=1500ot/d$ )*

## 4.2 Srovnání výsledků měření

Z vlastních naměřených průběhů skutečného proudu je vidět, že u unipolárního řízení v porovnání s bipolárním se objevuje menší zvlnění proudu kotvou. Tento výsledek jen potvrzuje teorii. Měřením byla prokázána funkčnost zařízení jak v motorickém, tak i v brzděném režimu. Až při zpracování jsem si všimnul, že ve většině zobrazených průběhů došlo k posunu značky označující nulovou hodnotu u kanálu číslo 1.

## 5. Závěr

Konečným cílem této diplomové práce byla praktická konstrukce a ověření činnosti dynamometru malých výkonů. Při řešení tohoto úkolu jsem postupoval důsledně podle zadání, provedl jsem rozbor možností řešení dynamometru s ohledem na použitý pohon a způsoby jeho řízení. Navrhl a realizoval jsem dynamometr se stejnosměrným motorem s permanentními magnety, jenž je řízený mikropočítačovým řídicím systémem. Na realizovaném zařízení jsem provedl zkoušky a měření podle pokynů vedoucího diplomové práce.

Realizované zařízení splňuje základní zadání, což bylo ověřeno provedenými zkouškami a jeho konstrukce umožňuje jeho další zdokonalování hlavně v oblasti jeho programového vybavení.

## Použitá literatura:

- [1] PATOČKA, Miroslav. *Vybrané stati z výkonové elektroniky : Svazek II.* druhé. Brno : PC-DIR Real, s.r.o., Brno, 1997. 175 s. ISBN 80-214-1258-5.
- [2] VONDRAŠEK, František. *VÝKONOVÁ ELEKTRONIKA : SVAZEK III.* první. Plzeň : Vydavatelství Západočeské univerzity, 1998. 252 s.
- [3] NEBORÁK, Ivo. *Modelování a simulace elektrických regulovaných pohonů.* první. Ostrava : [s.n.], 2002. 172 s.
- [4] ČERNÝ, Michal. *REALIZACE LABORATORNÍHO STANOVISTĚ SE STEJNOSMĚRNÝM REGULAČNÍM POHONEM.* Ostrava, 2004. 61 s. Diplomová práce. VŠB - TU Ostrava.
- [5] ŠKOPEK, Martin. *Inovace laboratorního stanoviště se stejnosměrným regulovaným pohonem.* Ostrava, 2006. 61 s. Diplomová práce. VŠB - TU Ostrava.
- [6] SOBEK, Martin. *Laboratorní stanoviště pro předmět Mikropočítačové řídicí systémy II.* Ostrava, 2008. 54 s. Diplomová práce. VŠB - TU Ostrava.
- [7] 56F802X and 56F803X. Peripheral Reference Manual, Rev 2, [www.freescale.com](http://www.freescale.com), 12/2006
- [8] DSP56800E\_Quick\_Start, User's Manual, Rev 2.3, [www.freescale.com](http://www.freescale.com), 2/2007

## Seznam příloh:

1. Schéma napájecích zdrojů, výkres desky napájecích zdrojů, osazovací plán desky.
2. Schéma výkonové části měniče, výkres desky výkonové části měniče, osazovací plán desky.
3. Schéma analogových vstupů, schéma analogových výstupů a komunikace, výkres desky analogových vstupů, výstupů a komunikace, osazovací plán desky.
4. Výkres základního rámu, výkres držáku motoru, výkres spojovací hřídelky.
5. Rozvinutý tvar spodního dílu skříně pulzního měniče, výkres předního panelu skříně pulzního měniče, výkres zadního panelu skříně pulzního měniče.
6. CD - Zdrojové texty použitého programového vybavení dynamometru.